

TIIA-RIIKKA HEINONEN

Lumen irtoaminen junakalustosta raiteen epäjatkuvuuskohdissa



Tiia-Riikka Heinonen

Lumen irtoaminen junakalustosta raiteen epäjatkuvuuskohdissa

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 30/2013

Liikennevirasto
Helsinki 2013

Kannen kuva: Heikki Luomala

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-343-0

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Tiia-Riikka Heinonen: Lumen irtoaminen junakalustosta raiteen epäjatkuvuuskohdissa. Liikennevirasto, infra- ja ympäristöosasto. Helsinki 2013. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 30/2013. 125 sivua ja 1 liite. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-343-0.

Avainsanat: junat, lumi, raiteet, tutkimus

Tiivistelmä

Tässä tutkimuksessa perehdyttiin raiteen epäjatkuvuuskohtien ja junaan kertyneen lumen irtoamisen väliseen yhteyteen. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, millaisia värähtelyitä erilaiset epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat junakalustoon, ja millainen herätevaikutus junaan kertyneen lumen irtoamiseksi vaaditaan.

Lumi kiinnittyy junan alustaan adheesiovoimilla, joiden suuruus riippuu merkittävästi monista eri tekijöistä, kuten esimerkiksi lämpötilasta. Raiteessa oleva epäjatkuvuuskohta aiheuttaa junaan herätteen, jonka johdosta junan alustarakenteeseen kertynyt lumi voi irrota. Tämä aiheuttaa ongelmia erityisesti vaihdealueella, sillä junan alustasta irronnut lumi voi pudota vaihteen kielen ja tukikiskon väliin estäen siten vaihteen liikkeen.

Tutkimuksessa tehtiin kirjallisuusselvitys lumen ja jään ominaisuuksista. Samalla tarkasteltiin jään adheesiolujuutta teräkseen. Jää voi irrota teräksestä materiaalien liitoskohdasta, jolloin materiaalien välinen adheesio liitos katkeaa. Toisaalta jää voi myös murtua, jolloin jään koheesiosidokset katkeavat.

Tutkimuksessa on selvitelty laskelmien ja mittausten avulla erilaisten epäjatkuvuuskohtien aiheuttamia kiihtyvyyksiä junakalustossa. Lisäksi lumen irtoamista on tarkasteltu kuvaamalla kahta ongelmalliseksi todettua vaihdealuetta. Vaihdealueilla suoritettujen mittausten ja kuvausten avulla selvisi, että lunta irtoaa junan alustasta eniten lämpötilan ollessa hieman nollan asteen alapuolella. Tutkimuksessa mitattiin myös junaan kohdistuvia kiihtyvyyksiä Helsinki–Joensuu-rataosuudella. Mittauksissa kävi ilmi, että vaihteiden aiheuttama herätevaikutus junakalustossa kasvaa junan nopeuden kasvaessa. Vaihteen epäjatkuvuuskohta aiheuttaa siis suuremmat kiihtyvyydet junakalustoon junan nopeuden kasvaessa. Mittausten aikana keskimäärin suurimmat kiihtyvyyssamplitudit syntyivät juuri vaihteiden kohdalla, ja voidaankin sanoa vaihteiden olevan merkittävä värähtelyiden aiheuttaja junakalustossa. Jos junakalustoon kertynyt lumi siis irtoaa nimenomaan raiteen epäjatkuvuuskohtien aiheuttaman herätteen vaikutuksesta, on todennäköistä, että juuri vaihde aiheuttaa lumen irtoamisen.

Laskelmien avulla saadut lumen ja jään irtoamiseksi vaadittavat kiihtyvyydet ovat usein selvästi suurempia kuin mittauksissa saadut maksimikiihtyvyydet. Raiteen epäjatkuvuuskohtien aiheuttama kiihtyvyys ei siis yleensä yksinään riitä irrottamaan lunta ja jäätä. Lumen ja jään kiinnittymisvoimat vaihtelevat kuitenkin paljon, ja heikosti kiinnittynyt lumi voi irrota pienelläkin kiihtyvyyden arvolla. Junakalustoon kiinnittyneen lumen ja jään irtoamisen ja raiteen epäjatkuvuuskohtien välistä yhteyttä pitäisi tutkia vielä käytännössä, jotta saataisiin tarkempaa tietoa siitä, millaiset kiihtyvyydet riittävät irrottamaan junakalustoon kertynyttä lunta ja jäätä.

Tiia-Riikka Heinonen: Snölossning från tågmaterielen vid diskontinuitetsställen på spåret. Trafikverket, infrastruktur och miljö. Helsingfors 2013. Trafikverkets undersökningar och utredningar 30/2013. 125 sidor och 1 bilaga. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-343-0.

Sammanfattning

I denna undersökning studerades sambandet mellan diskontinuitetsställen på spåret och snölossning från tåg. Syftet med undersökningen var att utreda hurdan vibration olika slags diskontinuitetsställen medför för tågmaterielen och hurdan excitation som krävs för att snö som fastnat på tåget ska lossna.

Snön fäster sig på tågets underrede med adhesionskrafter, vars styrka i hög grad beror på många olika faktorer, såsom t.ex. temperaturen. Ett diskontinuitetsställe på spåret ger tåget en excitation som kan få snö på tågets underrede att lossa. Detta ger upphov till problem särskilt i växelzonen eftersom snö som lossat från underredet på ett tåg kan falla mellan växeltungan och stödrälsen och förhindra växels funktion.

Inom ramen för undersökningen gjordes en litteraturutredning om egenskaper hos snö och is. På samma gång granskades adhesionsstyrkan mellan is och stål. Is kan lossa från stål vid de olika materialens anslutningspunkter, varvid adhesionen bryts. Å andra sidan kan också isen brista, varvid isens kohesionsbindning bryts.

I undersökningen behandlades acceleration i tågmateriel som beror på olika slags diskontinuitetsställen med hjälp av kalkyler och mätningar. Därtill granskades snölossningen genom att beskriva två växelzoner som har konstaterats vara problematiska. Mätningar och beskrivningar som gjordes i växelzonerna visade att snö lossar mest från tågets underrede när temperaturen ligger något under noll grader. I undersökningen mättes även accelerationer hos tåg på bansträckan Helsingfors-Joensuu. Mätningarna visade att den excitation som växlarna ger tågmaterielen ökar allteftersom tågets hastighet ökar. Ett diskontinuitetsställe i en växel medför alltså större accelerationer för tågmaterielen när tågets hastighet ökar. Under mätningarna uppkom de i snitt största accelerationsamplituderna vid växlarna, och därmed kan fastslås att växlarna är en betydande källa till vibrationer. Således, om snö som samlats på tågmaterielen lossnar uttryckligen till följd av den excitation som diskontinuitetsstället ger är det sannolikt att det är växeln som får snön att lossa.

De accelerationer som enligt kalkylerna krävs för att snö och is ska lossa är ofta klart större än de maximiaccelerationer som fåtts vid mätningar. Den acceleration som följer av ett diskontinuitetsställe på spåret räcker alltså i allmänhet inte till för att ensam lösgöra snö och is. Snöns och isens vidhäftningsstyrkor uppvisar emellertid stora variationer och snö som bara tagit fast lätt kan lossa enbart med ett lågt accelerationsvärde. Sambandet mellan snö- och islossning från tågmaterielen och diskontinuitetsställen på spåret borde undersökas ytterligare i praktiken för mer exakt information om hurdana accelerationer som räcker till för att få snö och is som samlats på tågmaterielen att lossa.

Tiia-Riikka Heinonen: Snow dislodged from rolling stock at rail gaps . Finnish Transport Agency, Infrastructure and the Environment. Helsinki 2013. Research reports of the Finnish Transport Agency 30/2013. 125 pages and 1 appendix. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-343-0.

Summary

This study investigated the connection between gaps in rails and the dislodging of snow accumulated on the train. The purpose of the study was to determine the vibrations caused in rolling stock by different types of gaps in rails, and what type of excitation is required to dislodge snow accumulated on trains.

Snow accumulates on the underside of trains as a result of adhesive forces, whose strength varies significantly according to various factors, such as temperature. A gap in the rail will send an excitation through the train, potentially dislodging the snow accumulated on the train chassis. This creates problems, particularly in turnout areas, since snow dislodged from the undersides of trains can fall between the turnout blade and stock rail, preventing the turnout from moving.

A literature survey on the characteristics of snow and ice was carried out as part of the study. An examination of the adhesive attraction of ice to steel was carried out at the same time. Ice may dislodge from steel at the seam between the materials, breaking the adhesive bond between them. On the other hand, ice may also break, also breaking the cohesive bonds within the ice.

The study used calculations and measurements to examine the accelerations caused in rolling stock by different types of gaps in rails. The dislodging of snow was also examined by photographing two turnout areas that had been found to suffer from this problem. From the measurements and photographs taken in the turnout areas, it was discovered that the most snow dislodges from train chassis when the temperature is slightly below zero. The study also measured the acceleration forces to which trains are subjected on the Helsinki–Joensuu railway section. The measurements indicated that the excitations caused by turnouts increase with the speed of the train. A gap in a turnout will therefore subject the train to greater acceleration forces as the train's speed increases. The greatest average acceleration amplitudes measured were generated precisely at turnouts, which can be stated to be a significant cause of vibrations in rolling stock. Therefore, if the snow accumulated on rolling stock becomes dislodged precisely due to the excitation caused by a gap in the rail, it is likely that the turnout is the cause.

The calculated acceleration required to dislodge snow and ice is frequently far greater than the measured maximum acceleration. Thus, the acceleration caused by a gap in the rail is not usually sufficient to dislodge snow and ice on its own. The adhesive forces of snow and ice vary greatly, however, and weakly attached snow may become dislodged at relatively minor acceleration values. The connection between the dislodging of snow and ice attached to rolling stock and gaps in rails should be subjected to further empirical study, in order to obtain more accurate data on the accelerations sufficient to dislodge snow and ice accumulated on rolling stock.

Esipuhe

Tämän diplomityön on tehnyt Tiia-Riikka Heinonen Tampereen teknillisen yliopiston Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä osana Elinkaaritehokas rata -tutkimusohjelmaa. Diplomityön rahoittajana oli Liikennevirasto.

Diplomityön ohjaajina toimivat dipl.ins. Ville-Pekka Lilja Liikennevirastosta sekä tekn.tri Antti Nurmikolu ja dos. Juha Miettinen Tampereen teknillisestä yliopistosta.

Helsingissä elokuussa 2013

Liikennevirasto

Infra- ja ympäristöosasto

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	9
2	LUMEN JA JÄÄN OMINAISUUKSISTA.....	10
2.1	Lumen eri muodot	11
2.2	Lumen fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet.....	12
2.3	Jään fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet	16
2.3.1	Koheesiovoimat.....	21
2.4	Jäätymisen fysiikkaa.....	22
2.5	Lumen ja jään kiinnittyminen rakenteeseen	24
2.5.1	Molekyylien väliset vuorovaikutukset rajapinnalla.....	24
2.5.2	Adheesiovoimat.....	25
3	VAIhteIDEN LUMIONGELMAT	29
3.1	Lumen kertyminen junan alustaan ja vaihteisiin.....	29
3.2	Lumen irtoaminen junan alustasta	31
3.3	Vaihteiden lumiongelmien vaikuttavat sääolosuhteet.....	33
3.4	Lumen poisto vaihteista	35
3.4.1	Lämmitys	35
3.4.2	Vaihteen kielen suojaus.....	36
3.4.3	Muut menetelmät	37
3.5	Menetelmät lumen kerääntymisen ehkäisemiseksi	38
3.5.1	Jäänestoaineet.....	38
3.5.1	Muut menetelmät	39
3.6	Menetelmät lumen irrottamiseksi kalustosta.....	40
3.6.1	Raiteen epäjatkuvuuskohta	40
3.6.2	Muut menetelmät	43
4	JUNAKALUSTON VÄRÄhteLY JA HERÄTTEET	44
4.1	Värähtelyn teoriaa	44
4.1.1	Liiketyhtälöt.....	45
4.1.2	Ominaisuuksien ja -muodot.....	46
4.1.3	Herätteet.....	47
4.2	Junakaluston värähtelykäyttäytyminen	49
4.2.1	Matkustajavaunu	53
4.2.2	Tavaravaunu.....	54
4.2.3	Ominaisuuksien laskeminen	56
4.3	Kaluston ja radan välisen dynamiikan mallintaminen	59
4.3.1	Radan värähtelyominaisuudet	59
4.3.2	Iskovoimat P1 ja P2.....	60
4.4	Vaihteen mallintaminen	62
5	TUTKIMUSMENETELMÄT	64
5.1	Värähtelylaskelmat	64
5.1.1	Junakaluston mallintaminen.....	64
5.1.2	Ominaisvärähtelymuodot.....	66
5.1.3	Kiskoja.....	66
5.1.4	Kiskopomppu	68
5.2	Lumen irtoamisen seuranta valikoiduissa vaihteissa.....	69
5.2.1	Seurattavien vaihteiden valinta.....	69

5.2.2	Seurantamenetelmä.....	71
5.2.3	Mittauslaitteet.....	73
5.3	Lumen kertymisen ja kiihtyvyyksien seuranta valikoidussa kalustossa.....	74
5.3.1	Kaluston valinta.....	74
5.3.2	Seurantamenetelmä.....	75
5.3.3	Mittauslaitteet.....	76
5.3.4	Kiihtyvyyksien tarkastelu.....	77
5.4	Raiteen epäjatkuvuuskohdan vaikutusten tarkastelu.....	79
5.4.1	Mittausjärjestelyt.....	79
5.4.2	Herätteet	80
6	TULOKSET	82
6.1	Seuranta vaihteissa.....	82
6.1.1	Junan nopeuden vaikutus lumen irtoamiseen.....	82
6.1.2	Lämpötilan vaikutus lumen irtoamiseen.....	84
6.1.3	Muut lumen irtoamiseen vaikuttavat asiat	86
6.2	Seuranta kalustossa	87
6.2.1	Kiihtyvyydet suorilla linjaosuuksilla	87
6.2.2	Vaihteiden aiheuttama tyypillinen värähtely junakalustossa	92
6.2.3	Junan nopeuden vaikutus vaihteiden aiheuttamaan värähtelyyn	94
6.2.4	Junakaluston värähtely myötä- ja vastavaihteeseen ajettaessa.....	96
6.2.5	Muut vaihteiden aiheuttamaan värähtelyyn vaikuttavat asiat.....	97
6.2.6	Muiden epäjatkuvuuskohtien aiheuttama värähtely junakalustossa ...	98
6.3	Laskentatulokset.....	99
6.3.1	Ominaismuodot	99
6.3.2	Kiskojaatkos	101
6.3.3	Kiskopomppu	107
6.4	Pohdinta epäjatkuvuuskohtien vaikutuksista.....	114
6.4.1	Epäjatkuvuuskohtien aiheuttamat kiihtyvyydet	114
6.4.2	Lumen irtoaminen junakalustosta.....	115
7	YHTEENVETO JA JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET	118

LIITTEET

Liite 1	Esiselvitys vaihteiden lumiongelmien ratkaisumahdollisuuksista (kirjoittajat Pekka Salmenperä ja Antti Nurmikolu, TTY)
---------	--

1 Johdanto

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tutkia erilaisten kiskoherätteiden vaikutusta lumen ja jään irtoamiseen junakaluston alustarakenteista. Lumi ja jää ovat talvi-aikaan aiheuttaneet paljon ongelmia raideliikenteelle etenkin viimeisten vuosien aikana, ja yksi ongelma-alue on ollut vaihteiden toimimattomuus. Lumi voi kertyä vaihteisiin lumisateena tai siirtyä vaihteisiin tuulen mukana. Toisaalta lunta voi myös pudota vaihteisiin vaihteen yli kulkevasta junasta. Vaihteen kohdalla kiskossa oleva epäjatkuvuuskohta aiheuttaa junaan herätteen, jonka johdosta junan alustarakenteisiin kertynyt lumi irtoaa. Vaihteen kielen ja tukikiskon väliin pudonnut lumi- tai jääkappale voi estää vaihteen liikkeen ja aiheuttaa siten vaihteen toimimattomuuden. Kalustosta saattaa irrota lunta hetkessä suuria määriä, ja siksi erityisesti tämä kalustosta kertyvä lumi on vaihteiden kunnossapidon kannalta ongelmallista.

Tässä tutkimuksessa on tarkasteltu junan alustarakenteisiin kertyneen lumen putoamista vaihdealueella ja muissa raiteen epäjatkuvuuskohdissa. Tarkoituksena on löytää yhteys junaan vaikuttavan herätteen ja lumen putoamisen välille. Lumen ominaisuudet eivät ole vakioita, vaan lumen käyttäytyminen on hyvin riippuvaista ympäröivistä olosuhteista. Lumen kiinnittymislajuuteen vaikuttaakin monta eri tekijää, joista esimerkiksi ympäristön lämpötila on hyvin merkittävä asia.

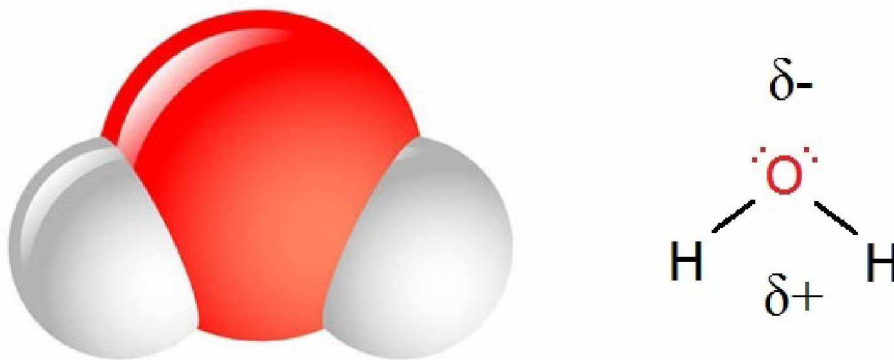
Tutkimus koostuu lumen käyttäytymiseen liittyvästä kirjallisuusselvityksestä ja laskelmista, joiden avulla on tarkoitus selvittää kiskoherätteen ja lumen irtoamisen välistä yhteyttä. Lisäksi työssä on kaksi erilaista seurantamittauksiin perustuvaa osuutta. Tarkoitus on ensinnäkin kuvata kahta ongelmalliseksi todettua vaihdetta ja tarkastella niihin putoavaa lunta. Tällä pyritään selvittämään, minkälaisesta kalustosta lunta irtoaa eniten ja miten junan nopeus ja toisaalta sääolosuhteet vaikuttavat lumen irtoamiseen. Toisessa osiossa junan alustaan kiinnitetään kamera ja seurataan lumen kertymistä ja irtoamista junan alustarakenteissa yhden junamatkan aikana. Junaan on lisäksi kiinnitetty kiihtyvyysanturit, joiden avulla voidaan selvittää junaan kohdistuneen kiihtyvyyden ja lumen irtoamisen välistä yhteyttä. Samalla selvittää, minkälaisia kiihtyvyyksiä vaihdealueet ja muut raiteen epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat junaan.

Luvussa 2 käsitellään lumen ja jään ominaisuuksia kirjallisuusselvityksenä. Samalla käydään läpi myös lumen kiinnittymistä rakenteeseen eli tarkastellaan lumen ja teräksen välillä vaikuttavia adheesiovoimia. Luvussa 3 keskitytään työn lähtökohtiin eli vaihteiden lumiongelmiin. Luvussa käydään läpi vaihteiden lumiongelmiin taustatiedot ja keinot, joilla ongelmaa on tähän mennessä yritetty ratkaista. Luvussa 4 käsitellään kaluston ja radan välistä värähtelyvuorovaikutusta. Luvussa kerrotaan junavauvon yleisestä värähtelykäyttäytymisestä sekä raiteen epäjatkuvuuskohtien aiheuttamista iskuvoimista ja niiden vaikutuksesta junakaluston värähtelykäyttäytymiseen. Junakaluston värähtelyliikettä voidaan kuvata liikeyhtälöillä, joiden avulla saadaan laskettua kaluston ominaisvärähtelymuodot. Luvussa 5 käsitellään työssä käytettyjä tutkimusmenetelmiä. Junakaluston dynaamista käyttäytymistä ja epäjatkuvuuskohtien junakalustoon aiheuttamia kiihtyvyyksiä tarkastellaan dynamiikkaohjelman avulla. Luvussa käydään myös läpi, miten työn käytännön osuudet on tehty. Vaihteisiin liittyvässä tutkimuksessa on selvitetty junakalustoon kertyneen lumen irtoamisen yhteyttä esimerkiksi ulkoilman lämpötilaan ja junan nopeuteen. Mittauksiin perustuvissa osuuksissa tarkastellaan myös erilaisten epäjatkuvuuskohtien junakalustoon aiheuttamia kiihtyvyyksiä. Luvussa 6 esitetään mittausten ja laskelmien tulokset ja niistä tehdyt päätelmät, ja luvussa 7 esitetään vielä päätuloksien yhteenveto sekä jatkotutkimusehdotukset.

2 Lumen ja jään ominaisuuksista

Lumen ja jään ominaisuudet vaihtelevat ympäröivien olosuhteiden, kuten esimerkiksi lämpötilan, mukaan. Lumen lujuusominaisuudet vaikuttavat merkittävästi siihen, kuinka paljon lumi aiheuttaa haittaa rautatievaihteessa. Toisaalta lujuusominaisuudet vaikuttavat myös siihen, kuinka helposti lumi irtoaan junan alustarakenteista.

Lumi ja jää koostuvat vesimolekyyleistä, jotka ovat kiinnittyneet toisiinsa vetysidoksilla. Vetysidos muodostuu vedyn ja jonkin hyvin elektronegatiivisen aineen, kuten hapen, välille. Näin muodostuva dipoli-dipolisidos on atomien suuren elektronegatiivisuuseron ja vetyatomien pienen koon vuoksi poikkeuksellisen luja. Vesimolekyylien välille muodostuvat vetysidokset aiheuttavat vedelle monia erityisiä fysikaalisia ominaisuuksia, kuten pintajännityksen ja molekyylin kokoon nähden poikkeuksellisen korkean kiehumis- ja sulamispisteen. Vesimolekyylin sisällä happi- ja vetyatomit ovat kiinnittyneet toisiinsa kovalenttisilla sidoksilla siten, että vetyatomit muodostavat $104,5^\circ$ kulman toisiinsa nähden (kuva 2.1). Vetysidoksien vahvuus on noin kymmenesosa kovalenttisen sidoksen vahvuudesta.



Kuva 2.1. Vesimolekyylin rakenne ja atomien osittaisvaraukset.

Lumi koostuu jääkiteistä, joten jään ja lumen erottelu toisistaan määritelmien avulla on vaikeaa. Lumen ja jään välinen ero voidaan kuitenkin määritellä kiderakenteiden avulla: lumeksi kutsutaan jään sellaista muotoa, jolla on avoin kiderakenne. Tämän vuoksi kaikki lumen lujuusominaisuudet ovat selvästi heikommät kuin jäällä. (Petrovic 2003.) Lisäksi jään määritelmän mukaan vesimolekyylit esiintyvät jäässä aina kiinteässä olomuodossa. Lumen tapauksessa vesimolekyylejä voi esiintyä myös muissa olomuodoissa, ja lumipeite sisältääkin jääkiteiden lisäksi myös nestemäistä vettä ja kosteaa ilmaa (Rasmus 2007). Lumen tiheys vaihtelee paljon, mutta sen arvo on kuitenkin aina alhaisempi kuin jäällä.

Lumen ja jään lisäksi puhutaan lumijäästä, joka sijoittuu ominaisuuksiltaan jään ja lumen välille. Tässä työssä puhutaan yleisesti lumesta, ja mikäli ei muuta mainita, sillä tarkoitetaan lumen lisäksi myös lumijäättä ja jäätä.

Lumen ja jään ominaisuuksiin vaikuttaa merkittävästi se, millaisissa ilmastollisissa olosuhteissa niiden kiderakenteet ovat syntyneet. Saman aineen eri kiderakenteet voivat poiketa toisistaan hyvinkin paljon, ja siten myös aineen ominaisuudet voivat vaihdella selvästi. Lisäksi lumen ja jään ominaisuuksiin vaikuttavat huomattavasti

ympäröivät olosuhteet. Tämän vuoksi lumen ja jään ominaisuuksia vertailtaessa tulee aina huomioida aineiden kiderakenne sekä tarkasteluolosuhteet.

2.1 Lumen eri muodot

Lumen kiderakenne ja ulkoilman lämpötila vaikuttavat selvästi siihen, kuinka paljon haittaa lumi aiheuttaa rautateillä. Ajon aikana lumiolosuhteet junan ympäristössä voivat vaihdella paljonkin. Tarkoituksena on löytää junan kulkemisen ja vaihteiden toiminnan kannalta hankalimmat lumiolosuhteet ja keskittyä niiden aiheuttamiin ongelmiin.

Seuraavassa on tarkasteltu sellaisia lumen ja jään olomuotoja, joista voi aiheutua haittaa raideliikenteelle.

Kuiva lumi (dry snow)

Kuiva pakkaslumi on kevyttä ja hienojakoista, joten lumihiukkaset pääsevät helposti kulkemaan tuulen mukana. Kuivan lumen aiheuttamat haitat on jaettu tuulen kuljet-taman lumen ja pölyävän lumen aiheuttamiin haittoihin. (Colbeck 1980.)

Tuulen kuljettama lumi (blowing snow)

Voimakas tuuli voi nostaa maasta irtonaista lunta ja kuljettaa sitä yli kahden metrin korkeuteen. Tuuli voi riepotella lumisateena tulevaa lunta tai nostaa jo maahan ehti-neen lumen uudelleen liikkeelle. Tuulen kuljettama lumi on yleensä kuivaa pakkaslun-ta, joka on niin kevyttä, että se nousee helposti ilmaan. (Colbeck 1980; Oksanen 1999.)

Pölyävä lumi (drifting snow)

Pölyävän lumen tapauksessa tuuli nostaa maasta irtonaista ja kevyttä lunta, joka nousee korkeintaan kahden metrin korkeuteen. Pölyävästä kuivasta lumesta on pal-jon haittaa maantie- ja rautatieliikenteessä, sillä se heikentää näkyvyyttä ja aiheuttaa lumikertymiä tielle. Pölyävä lumi ei estä näkyvyyttä yli kahden metrin korkeudessa, joten esimerkiksi lentoliikenteelle siitä ei ole haittaa. (WeatherOnline 2012.)

Kovassa tuulessa kulkeutuva pölyävä lumi voi pakkautua tiiviiksi eli sintrautua koh-datessaan esteen. Lumen sintrautuessa kiinteäksi sen lujuus kasvaa ja lumen poista-minen esimerkiksi rautatievaihteesta vaikeutuu. (Salmenperä & Nurmikolu 2012.)

Tykkylumi

Tykkylumi tarkoittaa puiden oksiin lujasti kiinni tarttunutta lumikertymää. Tykkylu-men syntymiseksi tarvitaan suuri ilmankosteus ja fysikaalinen tarttumismekanismi, joka kiinnittää veden puihin. Pääasiallisesti lumi kertyy puihin huurtumalla tai koste-an lumen tarttumisen ja jäätymisen seurauksena. (Ilmatieteen laitos 2012.) Lumi voi tarttua junan alustaan samantyyppisellä mekanismilla kuin tykkylumi tarttuu puihin.

Kuura (frost)

Kuura on jääkiteiden muodostama valkoinen peite rakenteiden pinnassa. Kuura syn-tyy, kun vesihöyry tiivistyy pakkasella suoraan kiinteäksi olomuodoksi eli härmistyy. (Ilmatieteen laitos 2012.) Kuurajään ominaispaino on alhainen, joten se ei lisää junan

jääkuormaa merkittävästi. Kuurajää voi kuitenkin muodostua myös junan alustan suojausten alle ja toimia alijäähtyneen veden kerääjänä. Tämä nopeuttaa jään kerääntymistä junan alustaan. (Salmenperä & Nurmikolu 2012.)

Huurre (frost)

Huurre on yhtä lailla jääkiteiden muodostama peite rakenteiden pinnassa. Erona kuuraan on huurteen muodostumistapa. Huurre muodostuu ilman suhteellisen kosteuden ollessa 100 %. Tällöin ilmasta tiivistyy alijäähtyneen nesteen pisaroita, jotka tarttuvat pintoihin ja jäätyvät niihin kiinni. (Ryerson 2008.)

Huurre voi kasvaa paksuksi tykkylumikerrokseksi (Ilmatieteen laitos 2012). Yleensä huurteen kerrospaksuudet ovat kuitenkin hyvin pieniä, ja huurre ei muodosta jäätä ongelmaksi asti. (Salmenperä & Nurmikolu 2012.)

Alijäähtynyt vesi (supercooled water, atmospheric ice)

Alijäähtynyt vesi jäätyy pakkasessa heti osuessaan kiinteään kappaleeseen. Kappaleeseen kertynyt jää on läpinäkyvää, ja kerrospaksuudet ovat tyypillisesti alle 30 mm. Kaikki avoimet rakenteet ovat alttiina jäätymiselle. (Ryerson 2008; Salmenperä & Nurmikolu 2012.)

Rakeet

Rakeet syntyvät vesihöyryn jäätyessä jonkin kiinteän pinnan, kuten esimerkiksi pölyhiukkasen, ympärille. Rakeet tarvitsevat voimakkaita nousevia ilmavirtauksia, jotka kuljettavat kehittyvät raealkiot ylös pilven keski- ja yläosiin jäätymään ja kiinteytymään. (Ilmatieteen laitos 2012.)

Rakeet voivat olla halkaisijaltaan jopa 80 mm, joten ne voivat teoriassa aiheuttaa haittaa rautatievaihteessa ajautuessaan vaihteen kielen ja tukikiskon väliin. Näin suuret rakeet ovat kuitenkin erittäin harvinaisia.

2.2 Lumen fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet

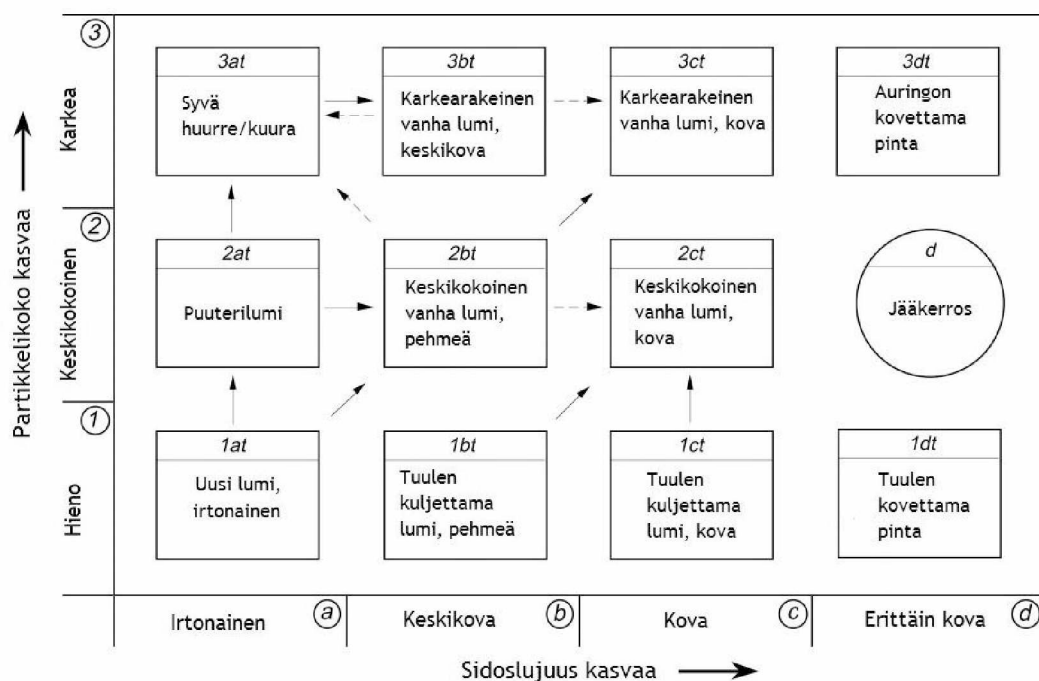
Lumen fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet riippuvat lumen rakenteesta ja ympäröivistä olosuhteista. Monet lumen ominaisuudet riippuvat lumen tiheydestä, ja esimerkiksi lumen lujuusominaisuudet voidaan päätellä pitkälti lumen tiheyden perusteella. Lumen tiheys vaihtelee paljon, esimerkiksi uuden lumen tiheys on noin 10–300 kg/m³. Kaikkein kevyintä lunta sataa kovalla pakkasella ilman ollessa kuiva. (Oksanen 1999.)

Lumen tiheys riippuu lumipartikkeleiden määrästä ja muodosta, ulkoilman lämpötilasta sekä lumen lujuuskehittymisestä. Lumen lujuuskehittyminen kuvaa lumen lujuusominaisuuksien muuttumista ajan suhteen. Talven aikana lumipeitteen tiheys kasvaa hitaasti alkutalven noin 200 kg/m³ arvosta keväiseen maksimitiheyteen, joka on Suomessa noin 300–400 kg/m³ (Oksanen 1999). Lumipeitteen tiheyden kasvu johtuu lumikiteiden sidoksia muuttavista metamorfooseista. Metamorfoosit eli muodonmuutokset alkavat heti lumisateen jälkeen ja jatkuvat siihen asti, kunnes lumi sulaa. Metamorfoosit aiheuttavat muutoksia lumikiteisiin ja niiden välisiin sidoksiin ja

sitä kautta lumen rakenteeseen ja ominaisuuksiin. Lumen ominaisuudet siis muuttuvat jatkuvasti.

Lumikiteiden metamorfoosiin vaikuttavat ympäröivät olosuhteet, kuten esimerkiksi auringon säteily ja tuulen voimakkuus. Tuulen vaikutusta lumikiteisiin kutsutaan mekaaniseksi metamorfoosiksi. Kun hiukkaset kulkeutuvat tuulen mukana, niiden sakaarat rikkoontuvat ja ne menettävät alkuperäistä muotoaan. Tämän vuoksi ne kykenevät pakkautumaan tiiviimmäksi lumikerrokseksi ja lumen tiheys kasvaa. Lumen tiheyteen vaikuttavat omalta osaltaan myös painovoima ja terminen metamorfoosi. Termisessä metamorfoosissa lämpimän maaperän ja kylmän ilman väliset lämpötilaerot aiheuttavat ajan kuluessa jääkiteiden muuttumisen tahkomaisiksi. (Oksanen 1999.)

Lumen lujuus riippuu lähinnä erillisten jääpartikkelien sidoslujudesta, partikkelien muodosta ja partikkelien keskinäisten sidosten lukumäärästä (Petrovic 2003). Kuvas-
ta 2.2 nähdään lumipartikkelien koon ja sidoslujuden välinen yhteys eri lumityypeil-
lä.



Kuva 2.2. Lumityyppien sijoittuminen sidoslujuden ja partikkelikoon perusteella (Shapiro et al. 1997).

Lumen lujuuteen vaikuttaa oleellisesti myös lumen tiheys, joka vaikuttaa lumikiteiden välisten sidosten määrään. Lumen tiheyden kasvaessa yhä useammat lumipartikkelit joutuvat kosketuksiin keskenään ja lumikiteiden välisten sidosten määrä kasvaa. Tämän vuoksi lumen tiheyden kasvaessa myös sen lujuusominaisuudet paranevat. Lumen tiheyden aikariippuvuutta voidaan kuvata yhtälön 2.1 avulla (Martinec 1977):

$$\rho(t) = \rho_0(1 + t)^{0.5} \quad (2.1)$$

missä

t on lumen satamisesta kulunut aika vuorokausina

ρ_0 on uuden lumen keskimääräinen tiheys, 100 kg/m³

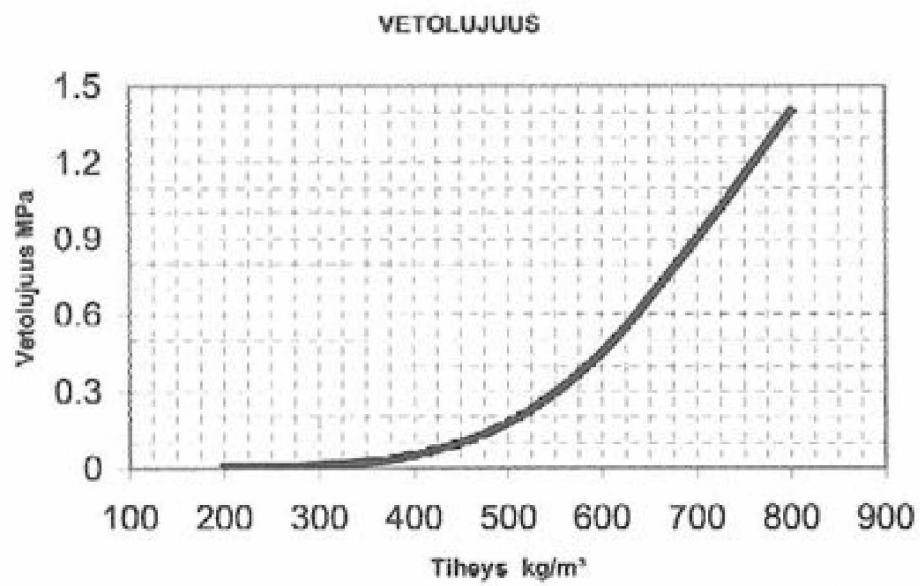
Tiheyden lisäksi lumen ominaisuuksiin vaikuttaa lumipartikkelien koko. Lumipartikkelien koko määritellään yleensä lumessa olevien jääkiteiden koon mukaan. Yleensä lumessa olevien jääkiteiden koko vaihtelee välillä 0,1–3 mm. Vastataneessa kuivassa ja kevyessä lumessa partikkelikoko voi olla vain 0,01 mm.

Taulukossa 2.1 on lueteltu lumen lujuusarvoja.

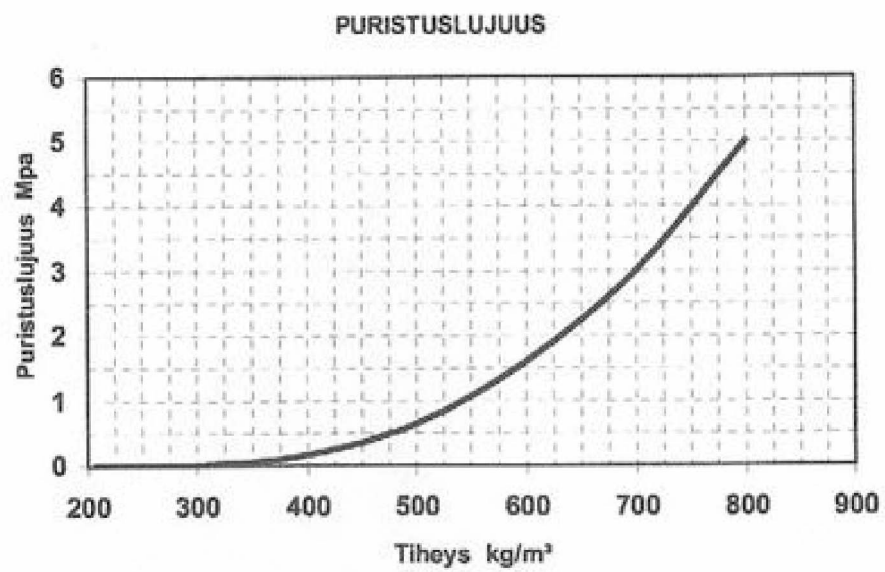
Taulukko 2.1. Lumen lujuusarvoja.

Kimmokerroin (GPa)	0,1-3 (RIL 2001)
Vetolujuus (MPa)	0-1,4 (RIL 2001) 0-0,3 (Petrovic 2003)
Puristuslujuus (MPa)	0-5 (RIL 2001) 0-2,5 (Hirochi et al. 2004)
Leikkauslujuus (MPa)	0-0,9 (RIL 2001) 0-1 (Shapiro et al. 1997)
Adheesiolujuus teräkseen (MPa)	0,086-0,134 (lumijää) (Jellinek 1960)
Koheesiolujuus (MPa)	0,01-0,035 (Shapiro et al. 1997)

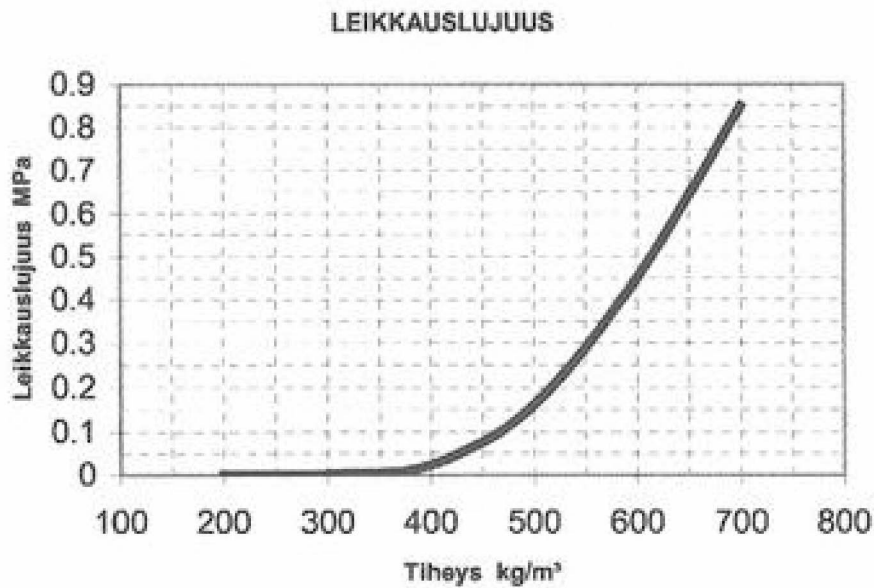
Arvoista huomataan, että lumen puristuslujuus on noin neljä kertaa suurempi kuin lumen vetolujuus. Lujuusarvoilla on suuret vaihteluvälit, sillä lumi alkaa saada lujuusominaisuuksia vasta sen tiheyden ollessa yli 400 kg/m³. Lumirakenteiden suunnittelu- ja rakentamisohjeessa RIL 218–2001 lumen lujuusarvot onkin määritelty lumen tiheyden mukaan. Ohjeen mukaiset lujuusarvot on esitetty kuvissa 2.3–2.5.



Kuva 2.3. Lumen vetolujuus tiheyden funktiona (RIL 2001).



Kuva 2.4. Lumen puristuslujuus tiheyden funktiona (RIL 2001).

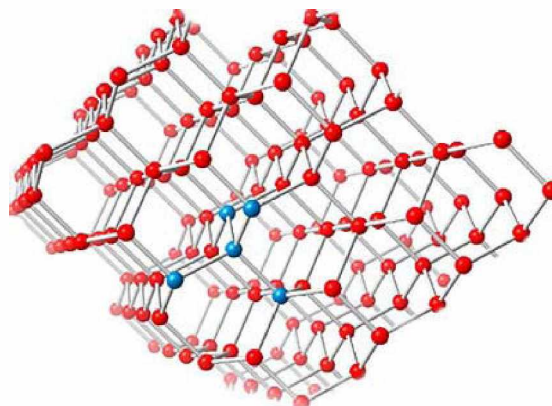


Kuva 2.5. Lumen leikkauslujuus tiheyden funktiona (RIL 2001).

Kuvista huomataan, että lumen lujuusarvot todella alkavat kasvaa vasta tiheyden ylittäessä 400 kg/m³. Käyrät jatkuvat vain tiheyteen 800 kg/m³ saakka, sillä tiheyden ollessa korkeampi lumi alkaa jo käyttäytyä jään tavoin. Tällöin ei puhuta enää lumesta, vaan lumen ja jään väliin sijoittuvasta lumijäästä.

2.3 Jään fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet

Jäässä vesimolekyylit muodostavat täydet neljä vetysidosta, jolloin normaaleissa jäätymisolosuhteissa jäälle muodostuu kuvan 2.6 mukainen säännöllinen heksagonaalinen rakenne.



Kuva 2.6. Jään heksagonaalinen rakenne (Janda Lab 2008).

Jään molekyyli rakenne vie paljon tilaa, sillä vetyatomien 104,5° kulma aiheuttaa sen, että rakenne pysyy väljänä. Tilaa vievän molekyyli rakenteen vuoksi jään tiheys on pienempi kuin nestemäisellä vedellä.

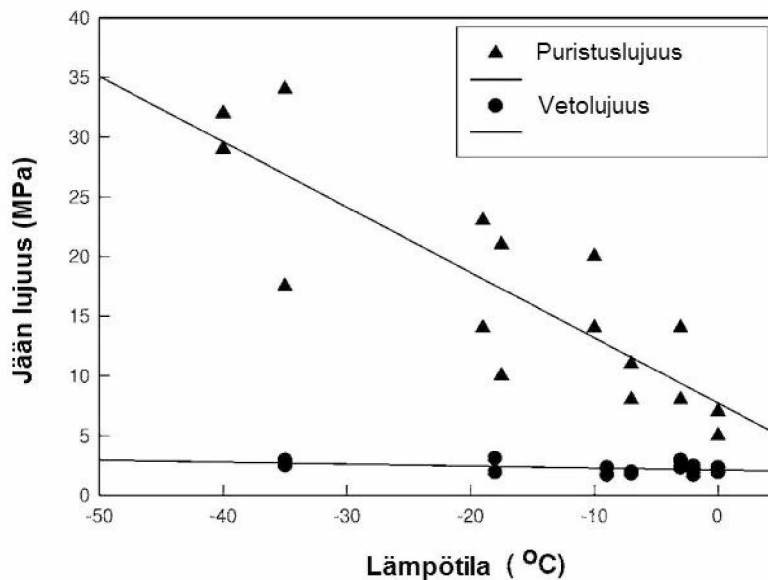
Toisin kuin lumen tapauksessa jään tiheys on yleensä melko vakio, $\rho = 917 \text{ kg/m}^3$. Tämä johtuu jään heksagonaalisesta kiderakenteesta, joka pysyy normaaliolosuhteissa muuttumattomana. Jään lujuusarvoihin vaikuttavat kuitenkin monet muut tekijät, kuten esimerkiksi lämpötila, aineen suolapitoisuus, aineen kidekoko ja kuormitusnopeus (Holtttinen et al. 1998). Toisaalta jään lujuus riippuu myös kuormituksen suunnasta. Jää voi olla 2–3-kertaa lujempaa pystysuunnassa vaakasuuntaan verrattuna (Mohamed & Farzaneh 2011). Taulukossa 2.2 on lueteltu jään lujuusarvoja. Jään puristuslujuus on erittäin suuri, mutta veto- ja leikkauslujuus selvästi pienempiä.

Taulukko 2.2. Jään lujuusarvoja.

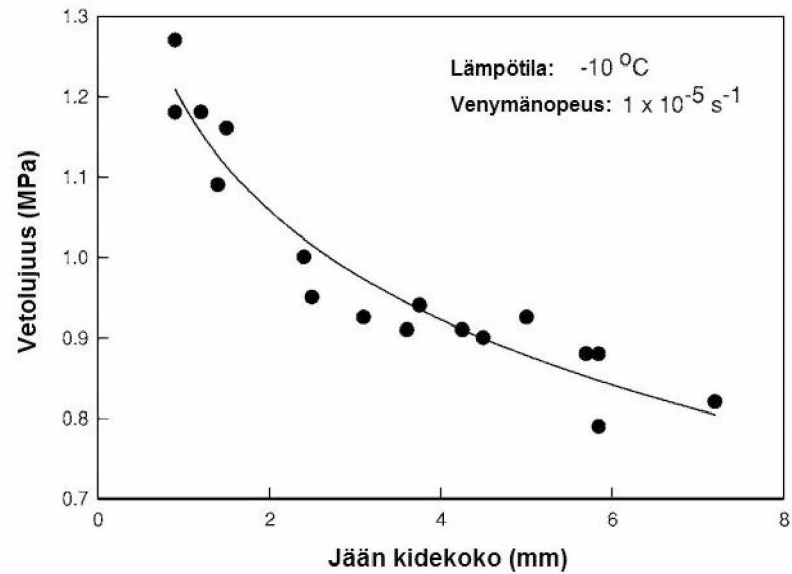
Kimmokerroin, luonnonjää (GPa)	3–6 (Holtttinen et al. 1998)
Kimmokerroin, ehyt jää (GPa)	9,7–11,2 (Petrovic 2003) 9,3 (Schulson 2001) 9 (Holtttinen et al.1998)
Vetolujuus (MPa)	0,9–1,6 (Mohamed & Farzaneh 2011) 0,7–3,1 (Petrovic 2003)
Puristuslujuus (MPa)	2,3–5,1, $T = -6^{\circ}\text{C} \dots -20^{\circ}\text{C}$ (Kermani et al. 2007) 5–25, $T = -10^{\circ}\text{C} \dots -20^{\circ}\text{C}$ (Petrovic 2003) 4–20 (Schulson 2001) 0,3–4,5 (Holtttinen et al. 1998)
Taivutuslujuus (MPa)	0,25–0,7 (Holtttinen et al.1998)
Leikkauslujuus (MPa)	0,2–0,6 (Holtttinen et al.1998)
Koheesiolujuus (MPa)	1,57–1,67 kohesiivinen leikkauslujuus (Jellinek 1959, Seppingsin 2005 mukaan)
Myötöraja (MPa)	12–20, $T = -15 \dots -45^{\circ}\text{C}$ (Seppings 2005) 5–13, $T = -20^{\circ}\text{C}$ (Xu et al. 2003 & 2004, Seppingsin 2005 mukaan) 6–26 (Jones 1982)
Poissonin vakio ν	0,29–0,32 (Petrovic 2003) 0,325 (Schulson 2001)

Jään lujuusarvoille löytyy kirjallisuudesta hyvinkin erilaisia arvoja. Arvoja tarkastellessa tulee aina huomioda muun muassa mitatun jään suolapitoisuus, kuormitusnopeus tai venymänopeus ja lämpötila, jossa mittaukset on suoritettu. Esimerkiksi jään puristuslujuuden arvot vaihtelevat kirjallisuudessa paljon. Tämä johtuu ainakin siitä, että jään puristuslujuus kasvaa lämpötilan laskiessa, joten eri lämpötiloissa suoritettut mittaukset antavat puristuslujuudelle erilaisia tuloksia. Myös venymänopeus vaikuttaa selvästi puristuslujuuden arvoon. Vetolujuus sen sijaan ei juuri riipu lämpötilasta eikä venymänopeudesta (Petrovic 2003; Mohamed & Farzaneh 2011). Vetolujuuden arvo kuitenkin laskee kidekoon kasvaessa, joten myös kidekoko tulee huomioda lujuusarvojen käytössä.

Kuvassa 2.7 on kuvattu jään vetolujuuden ja puristuslujuuden riippuvuutta lämpötilasta. Vetolujuuteen lämpötila ei vaikuta, mutta puristuslujuus kasvaa jopa 7-kertaiseksi lämpötilan laskiessa. Tämän on katsottu johtuvan jään lämpötilariippuvaisesta vaurion muodostumisesta (Petrovic 2003). Kuvassa 2.8 on kuvattu vetolujuuden riippuvuutta jään kidekoosta.



Kuva 2.7. Jään puristuslujuuden ja vetolujuuden riippuvuus lämpötilasta (Petrovic 2003).

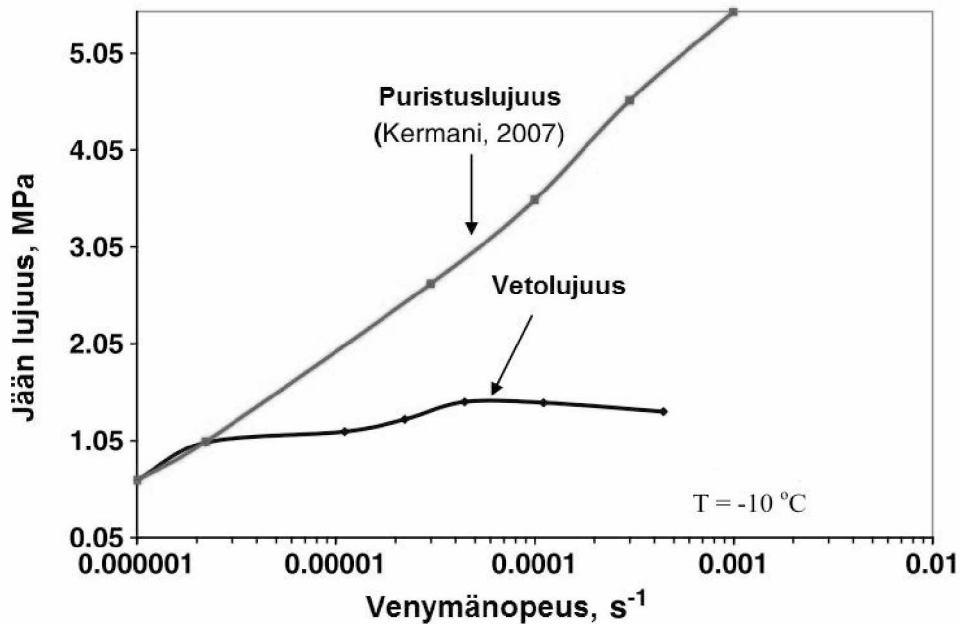


Kuva 2.8. Vetolujuuden riippuvuus jään kidekoosta (Petrovic 2003).

Jään vetolujuus kasvaa jopa kaksinkertaiseksi jään kidekoon pienentyessä. Puristuslujuuteen jään kidekoolla ei ole vaikutusta.

Alhaisilla venymänopeuksilla jään käyttäytyminen on sitkeää ja viskoelastista. Tällöin jäässä ei havaita merkkejä vaurioista tai säröistä (Kasaai & Farzaneh 2004, Javan-Mashmoolin 2005 mukaan). Korkeilla venymänopeuksilla jää on haurasta. Hauraalla alueella säröjä muodostuu helposti ja ne kehittyvät usein murtumaan saakka. Säröillä on suuri merkitys jään lujuuteen, muodonmuutokseen ja murtumiseen (Gold 1970, Javan-Mashmoolin 2005 mukaan).

Venymänopeudella ei kuitenkaan ole havaittu olevan juurikaan merkitystä vetolujuuteen (Mohamed & Farzaneh 2011). Kuvassa 2.9 on kuvattu jään veto- ja puristuslujuutta venymänopeuden funktiona. Vetolujuus ei juuri riipu venymänopeudesta, mutta puristuslujuuteen venymänopeudella on suuri vaikutus.



Kuva 2.9. Jään veto- ja puristuslujuus venymänopeuden suhteen (Mohamed & Farzaneh 2011).

Kuvaajasta nähdään, että pienillä venymänopeuksilla puristus- ja vetolujuuden arvot ovat suunnilleen samanlaiset. Kun venymänopeus on pieni, materiaalin muodonmuutokset johtuvat lähinnä uudelleen kiteytymisestä. Suuremmilla venymänopeuden arvoilla jään puristuslujuus alkaa kasvaa. (Mohamed & Farzaneh 2011.) Venymänopeus on suoraan yhteydessä kuormitusnopeuteen, joten kuormitusnopeuden kasvaessa jään puristuslujuus kasvaa.

Eri kuormitustilanteissa jää voi käyttäytyä joko sitkeän tai hauraan materiaalin tavoin. Materiaalin käyttäytymistä arvioitaessa tuleekin huomioda, millä venymänopeusalueella kuormitustilanteessa liikutaan. Junaan kertyneen lumen ja jään irtoamisen kannalta jään vetolujuudella on enemmän merkitystä kuin jään puristuslujuudella. Tämän vuoksi jään venymänopeudella ei kuvan 2.9 perusteella ole suurta vaikutusta junaan kertyneen jään käyttäytymiseen. Kuvan 2.7 mukaan jään vetolujuuteen ei vaikuta myöskään lämpötila. Lämpötila vaikuttaa kuitenkin jään adheesiolujuuteen ja sitä kautta jään irtoamiseen junan alustasta.

Kuvassa 2.10 on vertailtu taulukoista 2.1 ja 2.2 saatuja lumen ja jään keskimääräisiä maksimilujuusarvoja. Jään lujuusarvot ovat kaikilta osin paremmat kuin lumella.



Kuva 2.10. Lumen ja jään lujuuksien keskimääräiset maksimiarvot.

Myös kimmokertoimen arvo on jäällä vähintään kaksinkertainen lumen kimmokertoimeen verrattuna. Kimmokerroin ilmaisee materiaalin sisäistä jäykkyyttä.

2.3.1 Koheesivoimat

Koheesio kuvaa molekyylien välisten sidosten lujuutta materiaalin sisällä. Vesimolekyylit alkavat muodostaa molekyyli-sidoksia keskenään noin 0 °C:n lämpötilassa. Kun lämpötila laskee, sidoksia alkaa muodostua lisää. Samalla jään koheesiolujuus kasvaa. Tällä perusteella voidaan siis sanoa, että jään koheesiolujuus riippuu lämpötilasta. Lämpötilan vaikutusta koheesioon voidaan kuvata seuraavalla tavalla (Fish & Zaretsky 1997):

$$c(T) = c_0 e^{\alpha(1 - T/T_m)} \quad (2.2)$$

missä

c on jään koheesiolujuus lämpötilassa T

c_0 on jään koheesiolujuus lämpötilassa 0 °C

T on lämpötila (K)

T_m on jään sulamislämpötila (K)

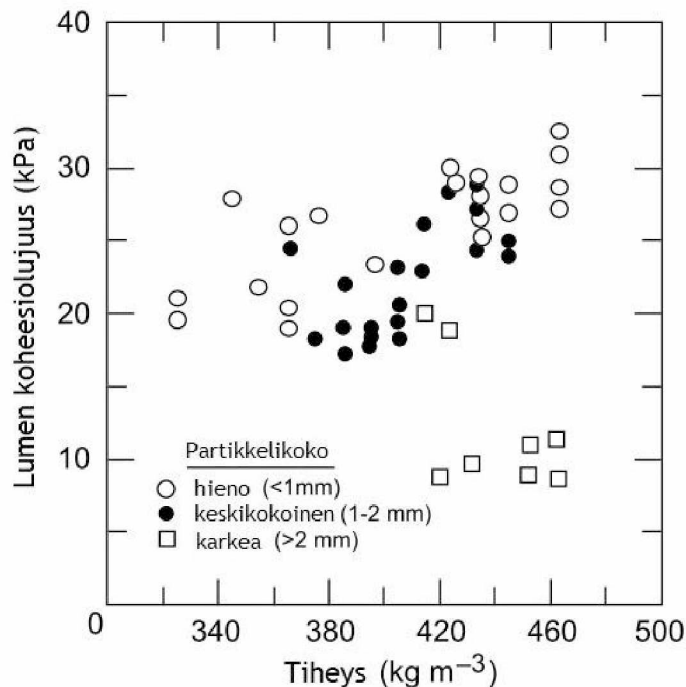
α on jäätyypistä riippuva parametri, esimerkiksi 9,61 (Fish & Zaretsky 1997)

Kaavan 2.2 mukaan jään koheesiolujuus voi kasvaa jopa kolminkertaiseksi lämpötilan laskiessa 0 °C:sta –30 °C:een.

Jään koheesiolujuus määrää jään kaikki lujuusominaisuudet. Koheesio vahvuuteen vaikuttavat jään rakenne ja kidekoko. Toisaalta on myös esitetty (Fish & Zaretsky 1997), että jään hiukkaskoko ei juuri vaikuttaisi jään koheesiolujuuteen, vaan jään koheesiolujuuden määräisi lähinnä jään rakenne.

Lumen koheesiolujuuteen vaikuttavat samat ominaisuudet, jotka määrittävät lumen lujuuden: erillisten jääpartikkelien sidoslujuus, partikkelien muoto ja koko sekä partikkelien keskinäisten sidosten lukumäärä. Lumessa jääpartikkelit muodostavat kes-

kenään vähemmän sidoksia kuin jäässä, joten lumen koheesiolujuus on aina pienempi kuin jäällä. Kuvassa 2.11 on kuvattu lumen koheesiolujuutta tiheyden suhteen.



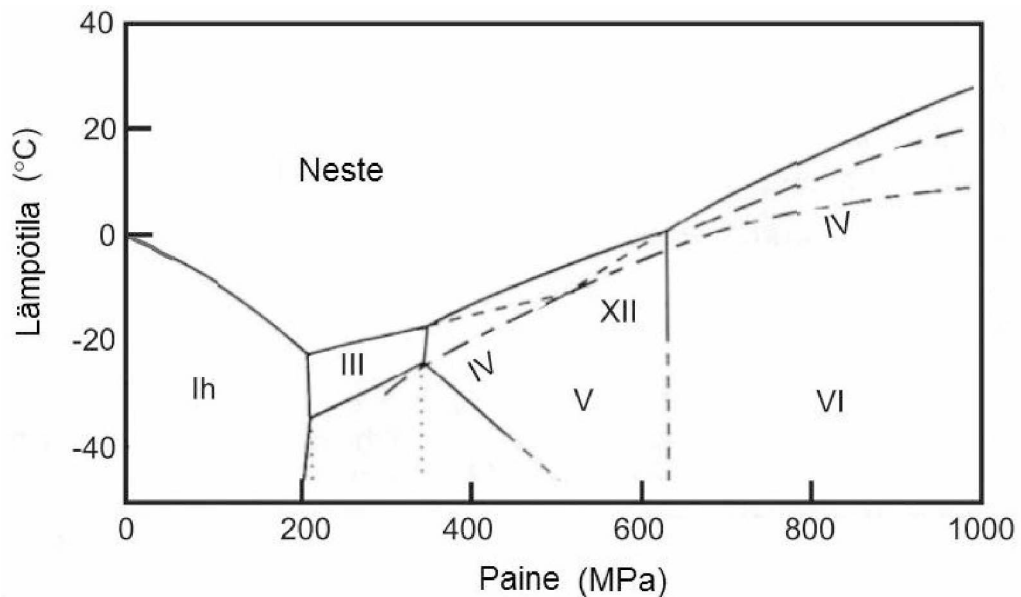
Kuva 2.11. Lumen koheesiolujuus tiheyden suhteen (Shapiro et al. 1997).

Kuvasta huomataan, että jääpartikkelien koon pienentyessä koheesiolujuus kasvaa. Toisaalta myös lumen tiheydellä on jonkin verran merkitystä koheesiolujuuteen: kun tiheys kasvaa, partikkelien välille muodostuu enemmän sidoksia ja siten myös koheesiolujuus kasvaa. Lumen koheesiolujuus ja sitä myötä myös lumen lujuusarvot ovat kuitenkin aina selvästi pienempiä kuin jäällä.

2.4 Jäätymisen fysiikkaa

Jää on veden kiinteä olomuoto, ja sitä voi muodostua nestemäisestä vedestä tai vesihöyrystä. Jäällä on monia eri kidemuotoja eli faaseja, joista jokainen voi muodostaa erilaisia rakenteita.

Jäällä on tällä hetkellä 15 tunnettua faasia, joista jokainen edustaa erilaista tapaa, jolla vesimolekyylit voivat ryhmittäytyä. Normaaliolosuhteissa selvästi yleisin muodostuva kidemuoto on heksagonaalinen I_h : kun vesi jäätyy normaalissa ilmanpaineessa, muodostuvalla jäällä on kuvan 2.12 mukaisesti aina heksagonaalinen I_h -kiderakenne (Seppings 2005). Tässä työssä on tarkasteltu tarkemmin ainoastaan I_h -faasissa olevan jään rakennetta, sillä normaaliolosuhteissa syntyvällä jäällä on lähes poikkeuksetta heksagonaalinen I_h -kidemuoto.



Kuva 2.12. Osa jään faaseista eri lämpötiloissa ja paineissa (Seppings 2005).

Jää voi muodostaa monenlaisia olosuhteista riippuvia rakenteita Ih-faasissa. Seuraavassa on lueteltu yleisimpiä jään rakenteita.

Jääkiteet (*Ice Single Crystals*)

Jääkiteet ovat perusta kaikille muille jään olomuodoille, joita voi muodostua. Kiteet säilyttävät jään heksagonaalisen rakenteen. Jääkiteiden kidekoko on suuri. Jääkide voi kasvaa useita metrejä pitkäksi ja olla tällöin jopa 50 mm leveä. (Seppings 2005.)

Monikiteinen jää tai rakeinen jää (*Polycrystalline Ice/ Granular Ice*)

Jään rakeisessa muodossa jääkiteet ovat suuntautuneet sattumanvaraisesti. Tiiviisti pakkautunut monikiteinen jää muodostuu, kun vesi jäätyy kylmälle metallipinnalle. (Seppings 2005.)

Pilarijää (*Columnar Ice*)

Pilarijää koostuu useista rinnakkaisista pilarimaisista jääkiteistä. Tämä on yleinen jää rakenne luonnossa. (Seppings 2005.)

Dendriittinen jää (*Dendritic Ice*)

Dendriittisessä rakenteessa jään rakenne on haarautuva. Rakenteessa on peruskide, josta muut kiteet haarautuvat. Rakenne ei ole kovin kestävä, sillä monet haarautuneet jääkiteet rikkoutuvat ajan myötä. Dendriittinen rakenne voi muodostua, kun epäpuhtauksia sisältävä vesi jäätyy kylmälle metallipinnalle. (Seppings 2005.)

Jään muodostuminen voi tapahtua monella eri tapaa, ja muodostumismekanismeilla on suuri vaikutus jään rakenteeseen ja mekaanisiin ominaisuuksiin. Erilaiset mekanismit voidaan luokitella primääriseen (*Primary / Bulk nucleation*) ja sekundääriseen (*Secondary / Contact nucleation*) tiivistymiskeskuksen muodostumiseen.

Primäärinen mekanismi (Primary / Bulk nucleation)

Primäärisessä tiivistymiskeskuksen muodostumisessa jää muodostuu homogeenisen mekanismin avulla. Jäätymisen aiheuttaa vesimolekyylien yhteentörmäys ja sen jälkeen tapahtuva kasaantuminen. Primäärinen jään muodostuminen ei tarvitse jäätymisydintä. (Hobbs 1974; Seppings 2005.)

Sekundäärinen mekanismi (Secondary / Contact nucleation)

Sekundäärisessä tapauksessa jään muodostumismekanismi on heterogeeninen. Tässä vaihtoehdossa jokin epäpuhtaus edesauttaa jään muodostumista toimimalla jäätymisytimenä, jonka ympärille jäätyminen alkaa tapahtua. (Hobbs 1974; Seppings 2005.)

Heterogeeninen jäätyminen alkaa heti lämpötilan laskiessa 0 °C:n alapuolelle, kun taas homogeenista jäätymistä tapahtuu vain alle -40 °C:n lämpötiloissa. Normaaliolosuhteissa jäätyminen tapahtuukin yleensä heterogeenisesti, eli kiteytyminen alkaa käytännössä aina jonkin epäpuhtauden ympärille. (Oksanen 1999.)

2.5 Lumen ja jään kiinnittyminen rakenteeseen

Jää kiinnittyy kiinteään kappaleeseen adheesiovoimalla. Jään adheesiolujuus metalleihin on suurempi kuin jäämolekyylien keskinäinen koheesiolujuus, joten jäätä poistettaessa jää ei yleensä irtoa jään ja metallin liitoskohdasta vaan murtuu. Metallia ei tällöin puhdistu jäältä (Kivioja 2007). Toisaalta lämpötilan ollessa tarpeeksi korkea, jään irtoaminen voi olla myös adheesiivista, jolloin jää irtoaa kappaleiden liitoskohdasta.

Jäätyminen ja jään suuri adheesiolujuus aiheuttavat ongelmia muun muassa lentokoneen siivissä, laivoissa ja voimalinjoissa. Ennen jään poistamismenetelmien kehittämistä tulee ymmärtää rajapintojen fysiikkaa ja jään kiinnittymisessä vaikuttavia adheesiovoimia. Jää on poikkeuksetta lujempaa ja jäykempää kuin lumi, joten tässä kappaleessa on keskitytty lähinnä jään kiinnittymiseen rakenteeseen.

2.5.1 Molekyylien väliset vuorovaikutukset rajapinnalla

Jään pinnassa olevat molekyylit voivat liikkua vapaammin kuin jään sisällä olevat molekyylit, ja jään pinnassa olevien vesimolekyylien käytös onkin melkein vastaavaa kuin nestemäisessä tilassa olevien vesimolekyylien käytös. Siksi jään pintakerroksen ominaisuudet eivät ole samanlaiset kuin jään ominaisuudet yleensä, vaan ominaisuudet ovat pikemminkin jotain jään ja nestemäisen veden ominaisuuksien väliltä. (Oksanen 1999.)

Kahden kiinteän kappaleen välinen sidoslujuus riippuu kontaktikappaleiden materiaaliominaisuuksista. Useimmissa tapauksissa kahden kiinteän kappaleen välinen adheesiosidos on vahvempi kuin heikomman materiaalin koheesiovoimat. Siksi mahdollinen murtuma tapahtuu lähes poikkeuksetta heikomman materiaalin sisällä, ei kappaleiden liitoskohdassa. (Buckley 1981.)

Materiaalin pintaenergian avulla saadaan tietoa materiaalin koheesiosidoksista. Mitä suurempi materiaalin pintaenergian arvo on, sitä vahvempia ovat materiaalin koheesiosidokset. Pintaenergian arvo voidaan yksinkertaisimmillaan laskea Gilmanin kaavan avulla (Buckley 1981):

$$\gamma = \frac{(E/\gamma_0)(a_0/\pi)^2}{2} \quad (2.3)$$

missä

a_0 on vetovoimien etäisyys (*range or elastic distance of the attractive forces*)

E on kimmomoduuli

γ_0 on hilavakio (*equilibrium lattice constant perpendicular to plane*)

γ on pintaenergia

Kaavasta 2.3 nähdään, että pintaenergia on suoraan verrannollinen aineen kimmomoduuliin. Koska materiaalin koheesiolujuus on riippuvainen pintaenergian arvosta, koheesiolujuus riippuu myös aineen kimmomoduulista. Materiaalin sisäinen jäykkyys eli kimmomoduuli antaa siis tietoa aineen koheesiolujuudesta eli aineen sisällä olevien molekyylien välisestä sidoslujudesta.

Materiaalin pintaenergia vaikuttaa myös adheesiolujuuden arvoon. Mitä suurempi materiaalin pintaenergian arvo on, sitä suurempi on myös jään adheesiolujuus kyseiseen materiaaliin. (Javan-Mashmool 2005.)

2.5.2 Adheesiovoimat

Adheesiosidos muodostuu aina kahden erillisen kappaleen rajapinnalle. Kun kaksi kiinteää kappaletta tuodaan lähietäisyydelle toisistaan, niiden pintojen välille voi muodostua adheesiivinen sidos. Sidoksen lujuus riippuu toisiinsa kiinnittyneiden kappaleiden materiaaleista sekä pintojen laadusta ja puhtaudesta. Jään adheesiolujuuden ymmärtämiseksi on hyvä ensin selvittää, millaiset molekyyli- ja atomisidokset jään ja kiinteän kappaleen välillä vaikuttavat.

Jään adheesiossa vaikuttavat kolme mekanismia: kovalenttinen tai kemiallinen sidos, dispersio- tai van der Waals -voimat ja suora elektrostaattinen vuorovaikutus (Ryzhkin & Petrenko 1997). Mekanismien vaikutuksen osuus riippuu siitä, mihin materiaaliin jää kiinnittyy. Tutkimuksissa (Wilen et al. 1995, Petrenkon & Qin 1999 mukaan) on todettu, että jään ja teräksen välisessä adheesiossa Lifshitz-van der Waals -voimat eivät ole merkittäviä. Toisaalta on myös esitetty, että tärkein adheesiomekanismi jään ja kiinteän kappaleen välillä olisi useissa tapauksissa elektrostaattinen vuorovaikutus (Ryzhkin & Petrenko 1997).

Jään adheesiolujuudesta puhuttaessa tarkoitetaan yleensä jään adheesiivista leikkauslujuutta. Jään adheesiivisesta leikkauslujuudesta on tehty lukuisia tutkimuksia, joissa on testattu jään kiinnittymislujuutta eri materiaaleihin. Jäällä on myös adheesiivinen vetolujuus, mutta sen mittaaminen on erittäin hankalaa. Yleensä adheesiivista vetolujuutta mitattaessa tuloksena on jään koheesioaurio adheesioaurion sijaan. On kuitenkin arvioitu, että jään adheesiivinen leikkauslujuus on 15 kertaa pienempi kuin adheesiivinen vetolujuus. Ero johtuu todennäköisesti nestemäisestä kerroksesta jään ja kiinteän kappaleen välillä. Vedossa pintajännitys pitää kappaleet yhdessä, kun taas

leikkauksessa vain kitkavoimat pitävät kappaleita yhdessä. Kitkavoimat ovat suuruudeltaan paljon pintajännitysvoimia pienempiä. (Jellinek 1960.)

Yleensä jään adheesiolujuus teräkseen on suurempi kuin jäämolekyylien väliset koheesiovoimat. Tämä johtaa siihen, että jää ei irtoa teräksen ja jään liitoskohdasta vaan murtuu. Toisaalta kun ollaan tarpeeksi lähellä jään sulamispistettä, koheesiolujuus voi ylittää adheesiolujuuden, jolloin jää voi irrota myös jään ja metallin liitoskohdasta. Tämäkin selittyy jään ja teräksen rajapinnalla olevalla nesteen kaltaisella kerroksella, jonka johdosta jään adheesiolujuus pienenee lämpötilan kasvaessa. (Andrews & Lockington 1983.)

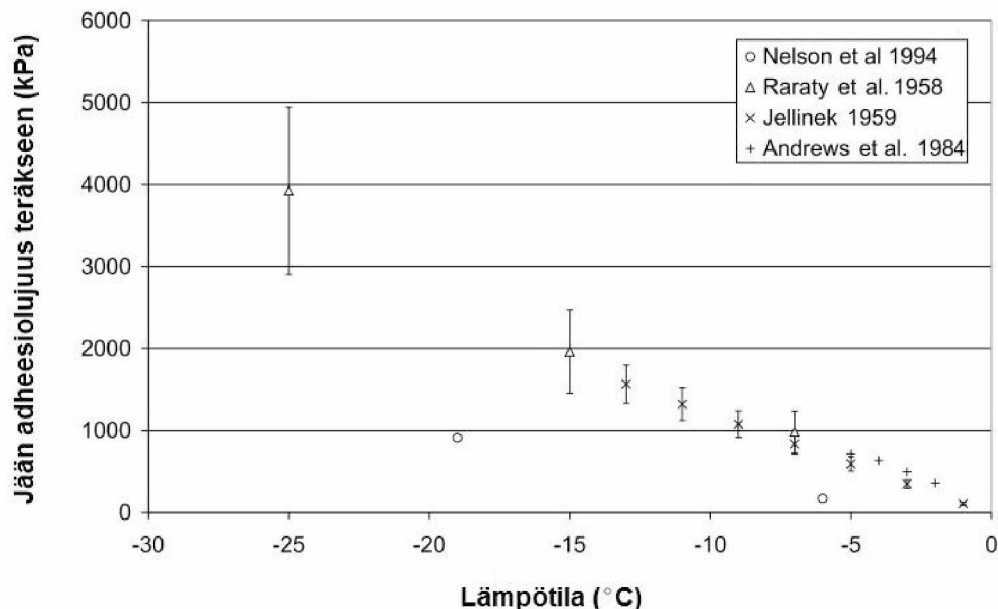
Taulukossa 2.2 nähdään useita eri tutkimustuloksia jään ja teräksen väliselle adhesiiviselle leikkauslujuudelle.

Taulukko 2.2. Jään adheesiolujuus teräkseen eri tutkimustulosten mukaan.

Jään adheesiolujuus τ teräkseen (MPa)	Mittauslämpötila T (°C)	Lähde
0,698	-10	Meuler et al. 2010
0,5	-10	US Army Corps of Engineers 2003
0,1–0,4	-	Holttinen et al. 1998
0,17–0,91	-6...-19	Nelson & Young 1994 Sep- pingsin 2005 mukaan
0,3–0,55	-2...-40	Makkonen 1994
0,4–0,8	0...-5	Andrews et al. 1984 Seppingsin 2005 mukaan
0,67–0,99	-10	Oksanen 1982
0,068–0,61	-4,5	Jellinek 1960
0,1–1,8	0...-13	Jellinek 1959 Seppingsin 2005 mukaan
0,8–5	-7...-25	Raraty et al. 1958 Seppingsin 2005 mukaan

Samanlaisilla mittausjärjestelyillä saatetaan saada hyvinkin erilaisia tuloksia jään adheesiovoimille. Tuloksiin vaikuttavat aina jäätyneen materiaalin pinnan karheus, pinnan puhtaus, lämpötila sekä jään rakenne. (Seppings 2005.) Taulukossa 2.2 on esitetty jään adheesiolujuuden lisäksi myös lämpötila, jossa mittaukset on suoritettu. Mittaukset, jotka on suoritettu muuten samoissa olosuhteissa lämpötilaa vaihdellen, vahvistavat jään adheesiolujuuden riippuvuuden lämpötilasta. Näistä tuloksista ei käy ilmi pinnan karheuden vaikutus adheesiolujuuteen. On kuitenkin todettu (Zou et al. 2010), että materiaalin pinnan karheuden lisääminen kasvattaa jään adheesiolujuutta kyseiseen materiaaliin.

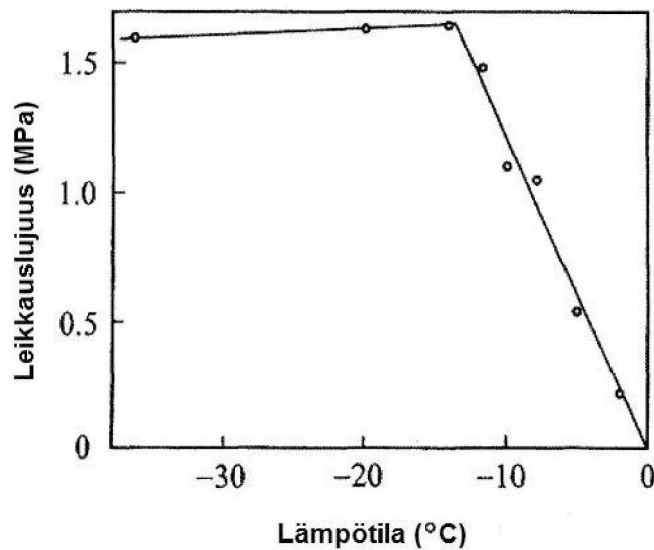
Kuvassa 2.13 on esitetty useiden tutkijoiden tulokset jään adheesiolujuuden vaihteluvälille eri lämpötiloissa. Siitä käy hyvin ilmi jään adheesiolujuuden riippuvuus lämpötilasta. Alhaisessa lämpötilassa adheesiolujuus on selvästi suurempi kuin nollan asteen tuntumassa.



Kuva 2.13. Jään adheesio teräkseen eri lämpötiloissa (Seppings 2005).

Kuvassa 2.14 on edelleen kuvattu teräspinnalle jäätyneen jään adheesiivisen leikkauslujuuden riippuvuutta lämpötilasta. Adheesiolujuus pysyy alhaisilla lämpötilan arvoilla suunnilleen vakiona. Lämpötilan noustessa adheesiolujuus on kääntäen verrannollinen lämpötilaan, eli lämpötilan kasvaessa adheesiolujuus pienenee. Kuva 2.14 vastaa etenkin korkeammilla lämpötilan arvoilla hyvin kuvaa 2.13.

Kuva 2.14 on koottu useista mittaustuloksista (Jellinek 1958, 1959 & 1962), joissa on tarkasteltu puhtaalle teräspinnalle jäätyneen lumijään leikkauslujuutta. Näissä tutkimuksissa yli $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötiloissa hajoaminen tapahtui adheesiivisesti, kun alle $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötiloissa murtuminen tapahtui koheesion kautta, eli jään sisällä. (Hobbs 1974.) Myöhemmin tehdyissä tutkimuksissa jään koheesiolujuus on osoittautunut lähes poikkeuksetta alhaisemmaksi kuin jään adheesiolujuus teräkseen, ja hajoaminen on tapahtunut adheesiivisesti vain jään sulamispisteen lähellä. (Andrews & Lockington 1983.)



Kuva 2.14. Jään ja teräksen välisen adhesiivisen leikkauslujuuden riippuvuus lämpötilasta (Javan-Mashmool 2005).

Adheesiolujuutta kasvattavat jään suolapitoisuuden aleneminen, lämpötilan laskeminen tai kuormitusnopeuden kasvattaminen (Holtinen et al. 1998). Toisaalta myös materiaalin pinnan karheuden lisääminen kasvattaa jään adheesiota materiaaliin, sillä jää tarttuu paremmin kiinni karheaan pintaan (Seppings 2005).

Periaatteessa jään irrottamiseksi tarvittava voima on kaavan 2.4 mukaisesti

$$F = \tau_a \cdot A_j \quad (2.4)$$

missä

F on adheesion irtoamiseen tarvittava voima

τ_a on jään adhesiivinen leikkauslujuus

A_j on pinta-ala, jolla jää on kiinnittynyt metalliin

Käytännössä voimaa ei kuitenkaan tarvita näin paljon. Adheesio nimittäin irtoaa progressiivisesti alkaen eniten rasitetusta kohdasta ilman, että täysi adheesiolujuus vaikuttaisi koko kosketuspinnalla samanaikaisesti (Holtinen et al. 1998).

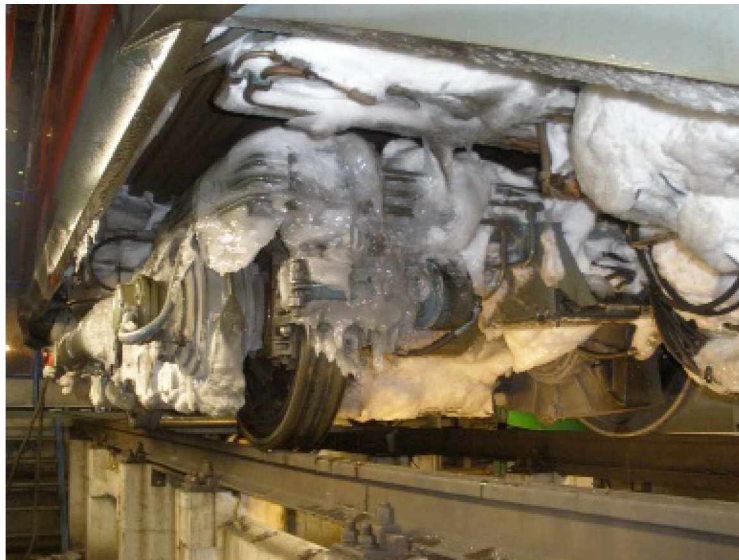
Adheesion irtoaminen muistuttaa asteittain tapahtuvaa murtumista. Kun adheesiolujuus eniten rasitetussa kohdassa on ylitetty, jään ja materiaalin väliin muodostuu särö. Tämän jälkeen säröjä alkaa muodostua lisää, ja lopulta jää irtoaa materiaalista kokonaan. (Seppings 2005.)

3 Vaihteiden lumiongelmat

Rautatievaihteen toiminta voi estyä, mikäli vaihteen kielen ja tukikiskon väliin kulkeutuu paljon lunta. Lunta voi kertyä vaihteeseen lumisateen aikana tai kulkeutumalla tuulen mukana. Toisaalta myös vaihteen yli kulkevasta junasta voi pudota lunta ja jäätä vaihteeseen.

3.1 Lumen kertyminen junan alustaan ja vaihteisiin

Lumi kertyy vaunuissa pääasiassa teliin ja alustarakenteisiin (kuva 3.1). Kerääntynyt lumi voi muuttua jääksi joko lämpötila- tai painemuutosten johdosta. Painemuutoksia voi aiheuttaa lumen jääminen puristuksiin liikkuvien osien väliin.



Kuva 3.1. Lähiliikennejunan alustarakenteisiin kertynyttä lunta (Liikennevirasto 2010).

Tiiviiksi pakkautunut lumi vaikeuttaa telin liikkumista ja vaikuttaa myös muiden vaunurungon alapuolella sijaitsevien komponenttien toimintaan. Vaunurungon alapuolelle kerääntynyt lumi ja jää voi haitata komponenttien liikeratoja ja vahingoittaa komponentteja. Lisäksi suuri määrä lunta tai jäätä hankaloittaa selvästi vaunujen huoltoa, sillä huollon täytyy tällöin odottaa vaunujen sulatusta ennen tarvittavien toimenpiteiden tekemistä. Lumen jäätyminen rakenteisiin voi aiheuttaa häiriöitä myös jarrujen toiminnassa, mikä turvallisuussyistä johtaa alhaisempien nopeuksien käyttöön raide liikenteessä. Talviolosuhteet ja lumen sekä kosteuden kerääntyminen junavaunuun aiheuttavat myös lukuisia muita ongelmia vaunun eri osille. Niitä ei kuitenkaan tässä käsitellä tarkemmin. (Liikennevirasto 2010.)

Junien alustarakenteisiin voi kerääntyä ja jäätyä tonneittain lunta, jolloin yhden junayksikön sulatus kestää jopa 12 tuntia. Jos kalustoa ei kuivata, pinnalle jäänyt vesi voi muuttua jääksi ja edesauttaa lumen kerääntymistä. Osa kalustosta on lisäksi erityisen herkkää kosteudelle ja edellyttää sulatuksen lisäksi huolellista kuivatusta, jolloin junayksikkö voi joutua olemaan poissa liikenteestä jopa kaksi vuorokautta. Pa-

himmissa talviolosuhteissa viivästymisiä aiheuttavat siis kaluston kannalta sekä junien sulattamiseen vaadittava aika että junien alennetut ajonopeudet. (Liikennevirasto 2010.)

Kaluston ongelmat heijastuvat myös rataverkon toimivuuteen. Junan alustarakenteista voi pudota lunta tai jäätä rautatievaihteeseen, jolloin vaihteen toiminta häiriintyy. Vaihteessa oleva epäjatkuvuuskohta aiheuttaa vaihteen yli kulkevaan junaan herätteen, jonka johdosta lunta irtoaa junasta usein juuri vaihteen kohdalla. Toisaalta lumi voi irrota kalustosta myös jarruttamisen aiheuttaman lämmön vaikutuksesta. Tällöin lunta irtoaa usein asemien läheisyydessä junan pysähtyessä. Junakalustosta lunta voi pudota hetkessä suuria määriä, tutkimuksen mukaan jopa kymmeniä kiloja kerralla (Railway Technical Research Institute 2004). Tämän vuoksi juuri kalustosta irtoava lumi on vaihteen kunnossapidon kannalta ongelmallista.

Lunta voi kerääntyä vaihteisiin myös lumisateena tai kulkeutumalla vaihteeseen tuulen mukana (kuva 3.2). Tuulen mukana kulkeutuva lumi on yleensä vaihteiden toiminnan kannalta hankalampaa kuin satava lumi, sillä se kasautuu korkeiksi kinoksiksi raiteisiin. Lisäksi tuulen mukana kulkeva lumi pakkautuu raiteen tarjoaman esteen kohdalla tiiviimmäksi ja kimmoisammaksi, ja siten sen poistaminen raiteilta vaikeutuu.



Kuva 3.2. Keravan vaihde V651 lumisateen jälkeen 2.4.2012.

Vaihteen kohdalle vaihteen kielen ja raiteen väliin pakkautunut lumi tai yli kulkevasta junasta irronnut jääkimpale estää vaihteen liikkumisen ja aiheuttaa siten toimintahäiriöitä vaihteeseen. Toisaalta myös vaihteen ulkopuolelle pakkautuneesta ja tiivistyneestä lumimassasta voi irrota kovia lumipalasia, jotka voivat tuulen tai junan ilmavirran avulla kulkeutua vaihteen kielen ja tukikiskon väliin.

3.2 Lumen irtoaminen junan alustasta

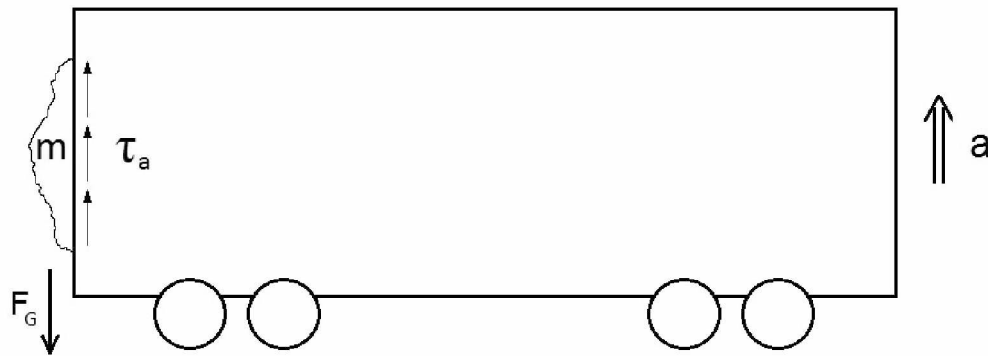
Nykyään käytössä olevat jatkuvaksi hitsatut kiskot eivät yleensä aiheuta suuria värähtelyjä kalustoon vaihtealueen ulkopuolella. Tämän vuoksi vaihteen epäjatkuvuuskohdan aiheuttama heräte aiheuttaa lumen ja jään putoamisen usein juuri vaihtealueelle. Esimerkki vaihteen epäjatkuvuuskohdasta on kuvassa 3.3.



Kuva 3.3. Rautatievaihte V001 Madesjärvellä.

Vaihteen aiheuttaman herätteen suuruus riippuu oletettavasti vaihteen tyypistä radan rakenteesta sekä yli ajavan junan tyypistä, nopeudesta ja ajosuunnasta. Myös sillä on merkitystä, ajaako juna vaihteesta suoraan vai poikkeavalle raiteelle. Heräte aiheuttaa kalustoon kiihtyvyyden, jonka johdosta kalustoon kerääntynyt lumi voi irrota. Toisaalta heräte voi aiheuttaa myös taipumia junarunkoon, jolloin junaan kerääntynyt lumi voi murtua ja siten irrota junasta.

Lumi on kiinnittynyt teräkseen adheesiovoimilla (luku 2.5). Lumen adheesiiviseksi irtoamiseksi tarvittava kiihtyvyys voidaan yksinkertaistettuna laskea junaan kiinnittyneen lumimassan tasapainoyhtälöstä (kuva 3.4). Kuvan 3.4 esimerkissä lumi on kiinnittynyt vaunun pätyyn, jolloin lumen irtoamista tarkastellaan adheesiivisen leikkauslujuuden ja vaunun pystysuuntaisen kiihtyvyyden avulla. Jos lumi olisi kiinnittynyt vaunun pohjaan, laskennassa käytettäisiin adheesiivisen leikkauslujuuden lisäksi vaunun vaakasuuntaista ja radansuuntaista kiihtyvyyttä.



Kuva 3.4. Junavaunuun kiinnittyneen lumen vapaakappalekuva.

Voima F_G toteuttaa yhtälön $F_G = mg$, jolloin tasapainoyhtälöksi saadaan

$$\sum F = \tau_a A - mg = ma \quad (3.1)$$

missä

τ_a on lumen tai jään adhesiivinen leikkauslujuus

A on ala, jolla lumimassa on kiinnittynyt junavaunuun

m on junavaunuun kiinnittyneen lumen massa

a on lumimassaan kohdistuva kiihtyvyys

Kaavasta (3.1) voidaan laskea lumen irrottamiseen tarvittava kiihtyvyys a :

$$a = \frac{\tau_a A - mg}{m} \quad (3.2)$$

Epäjatkuvuuskohdan aiheuttama heräte voi myös aiheuttaa junarunkoon taipumia, jolloin kiinnittynyt lumi tai jää saattaa murtua ja sen myötä irrota junasta. Jään murtolujuus taivutuksen suhteen on melko pieni, vain noin 0,5 MPa, ja lumen murtolujuus on vielä pienempi. Lumi ja jää murtuvat siis kohtuullisen helposti. Taivutusjännityksellä on ääriarvo kappaleen poikkileikkauksen ylä- ja alareunassa. Jännitys voidaan laskea kaavalla 3.3

$$\sigma_x = \frac{M_z}{I_z} y \quad (3.3)$$

missä

σ_x on taivutusjännitys

M_z on taivutusmomentti

I_z on neliömomentti z :n suhteen

y on etäisyys y -akselin suunnassa poikkileikkauksen pintakeskiöstä

R_m on murtolujuus

Kaavasta 3.3 voidaan laskea, kuinka suuri taivutusmomentti materiaalin murtamiseen tarvitaan. Lumi tai jää murtuu, kun jännityksen maksimiarvo ylittää murtorajan:

$$M_t = \frac{R_m I_x}{y} \quad (3.4)$$

Taipuma on suoraan verrannollinen taivutusmomenttiin ja kääntäen verrannollinen materiaalin kimmomoduuliin. Vaunurungon taipumista voidaan päätellä vaikuttava taivutusmomentti ja sitä kautta saadaan selville lumeen tai jäähän kohdistuvat jännitykset.

Toisaalta jännitykset voidaan päätellä myös taipuman säteen ρ avulla kaavan 3.5 mukaisesti:

$$\sigma_x = E \frac{y}{\rho} \quad (3.5)$$

Lumen tai jään murtamiseksi taipuman säteen tulisi siis olla kaavan 3.6 mukaisesti:

$$\rho = E \frac{y}{R_m} \quad (3.6)$$

Esimerkiksi jään arvoilla $E = 9$ GPa, $R_m = 0,5$ MPa ja $y = 25$ mm saataisiin vaadittavaksi taipuman säteeksi 450 m.

3.3 Vaihteiden lumiongelmiin vaikuttavat sääolosuhteet

Vaihteiden lumiongelmiä aiheuttavat lähinnä lumisade, tuulen mukana kulkeutuva lumi sekä junakalustosta irtoava lumi. Tuulen mukana kulkeutuva lumi on ongelmallisempaa kuin satava lumi, sillä se voi pakkautua vaihteeseen tiheäksi kinokseksi. Tuulen nopeudesta riippuen lumi kulkeutuu eri tavoin, mutta jo 4,5 m/s puhaltava tuuli pystyy irrottamaan lumikiteitä lumipeitteestä (Oksanen 1999). Vastasanut lumi irtaava lumipeitteestä helpoiten. Kulkeutuessaan tuulen mukana maassa lumahiukkaset menettävät alkuperäistä muotoaan mekaanisen metamorfoosin kautta. Lumikiteet kykenevät tällöin pakkautumaan tiiviimmin ja saavuttamaan tuulen nopeudesta riippuen tiheyksiä välillä 100–400 kg/m³ (Seligman 1936, Oksanen 1999 mukaan). Lumen tiheyden kasvaessa sen lujuusominaisuudet paranevat ja lumi muuttuu kimmoisammaksi ja kovemmaksi. Lujaa, tiiviiksi pakkautunutta lunta on vaikeampi poistaa rautatievaihteesta. Tiiviiksi pakkautunut lumi aiheuttaa myös todennäköisemmin vaihteen toimimattomuuden, sillä tiheä lumi estää vaihteen liikettä tehokkaammin kuin vastasanut, kevyt lumi. Toisaalta myös vaihteen liike itsessään aiheuttaa lumen pakkautumista tiiviimmäksi. Monissa vaihteissa on käytössä lämmitysjärjestelmä, mutta lämmitys ei yksinään riitä tiiviiksi pakkautuneen lumen poistamiseen (luku 3.4.1).

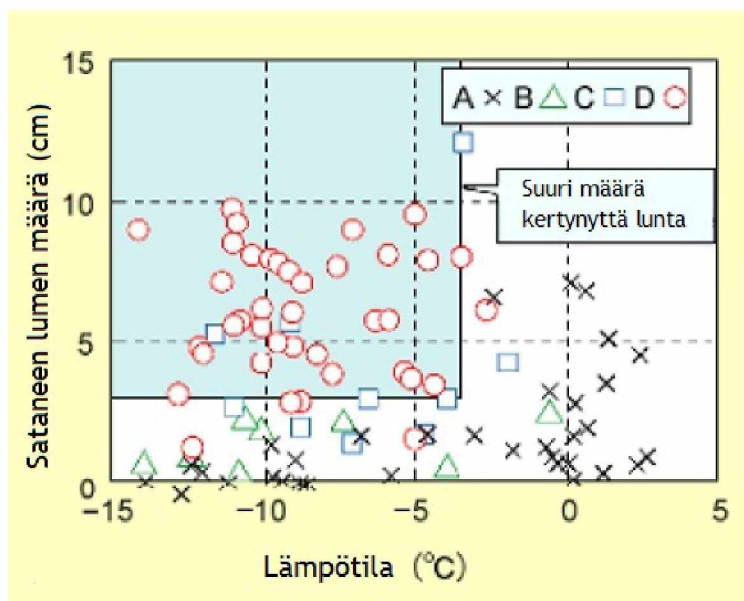
Vaihteiden toimintahäiriöitä voi aiheuttaa myös vaihteesta kulkeneen junan alustarakenteista pudonnut lumi. Lumen kerääntymisessä junan alustarakenteisiin on havaittu kaksi erityisen epäedullista sääolosuhdetta. Toinen on pöllyävän ja kuivan lumen esiintyminen. Kuiva lumi on kevyttä ja hyvin hienojakoista, ja kulkeutuu siksi helposti junan virtausten mukana. Pöllyävä lumi pakkautuu junan teliin ja alustarakenteisiin ja rajoittaa siten telin liikettä. (Kloov & Jenstav 2006.)

Toinen vaikea olosuhde on lämpötilan vaihtelevuus nollan asteen molemmin puolin. Kun lämpötila nousee nollan asteen yläpuolelle, junaan kertynyt lumi sulaa. Lämpötilan laskiessa nollan asteen alapuolelle, sulanut lumi jäätyy. Näin junaan alkaa muodostua jäätä, joka toimii kantavampana alustana edelleen kertyvälle lumelle. Lämpötilan vaihtelu voi johtua esimerkiksi junan kulkemisesta lämpoisemmän alueen poikki tai junan pysähtymisestä, jolloin muun muassa jarruista tuleva lämpö sulattaa lunta. Esimerkiksi tunneleissa on usein lämpimämpää kuin ulkoilmassa, joten pitkien tunnelien kohdalla lumi voi ehtiä sulamaan. (Kloow & Jenstav 2006.)

Nämä olosuhteet ovat yleisesti ottaen vaikeimpia junan toiminnan kannalta. Esimerkiksi pelkkä pakkanen tai kova tuuli eivät yleensä aiheuta ongelmia rautatieliikenteessä, mutta yhdistettynä muihin talvisiin sääolosuhteisiin, kuten esimerkiksi lumisateeseen, ne voivat olla hyvinkin haitallisia. (Kloow & Jenstav 2006.)

Junan alustarakenteisiin pakkautunut lumi ja jää rajoittavat junan telin liikeratoja ja vahingoittavat junan alustarakenteissa sijaitsevia komponentteja, mutta aiheuttavat myös haittaa vaihteissa. Jos junaan on kertynyt paljon lunta ja jäätä, sitä voi myös irrota junasta suuria määriä kerralla. Lämpötilan vaihtelu nollan asteen molemmin puolin lisää lumen irtoamisen riskiä, sillä nollan asteen tuntumassa lumi ja jää on heikommin kiinnittynyt junan alustaan (luku 2.5). Tällöin vaihteen aiheuttama heräte aiheuttaa todennäköisemmin lumen tai jään irtoamisen junan alustasta. Erityisesti jää voi kiinnittyä junan alustaan todella lujasti, joten jään irtoaminen kovalla pakkasella on hyvin epätodennäköistä.

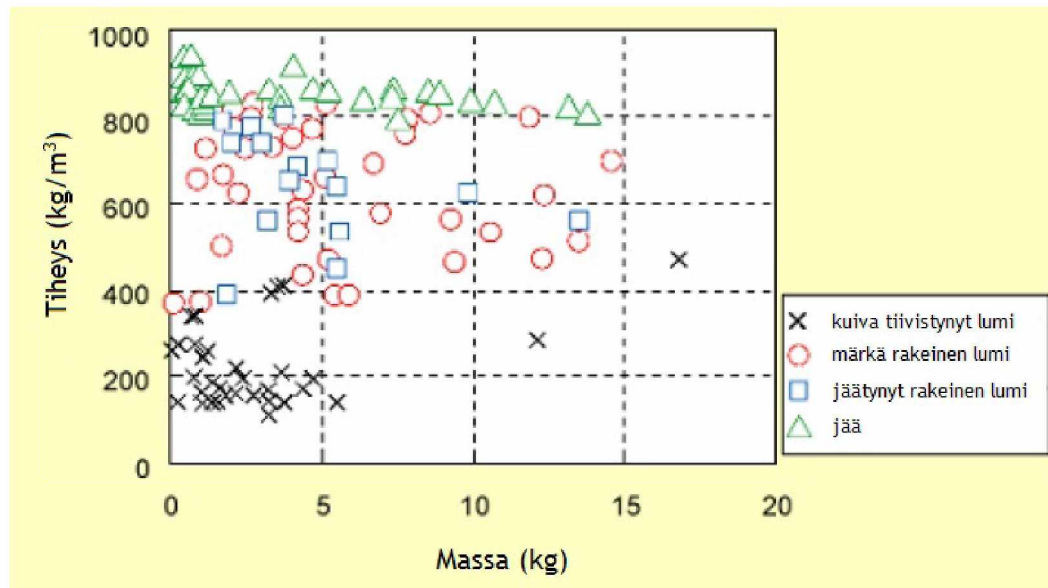
Tutkimukset Japanissa (Railway Technical Research Institute 2004) ovat osoittaneet, että lämpötilan ollessa $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ tai alle ja päivittäisen lumisateen määrän ylittäessä 30 mm, lunta ja jäätä kertyy junan alustaan runsaimmin. Tämä nähdään myös kuvasta 3.5, jossa on esitetty kertyneen lumen määrä eri sääolosuhteissa.



Kuva 3.5. Kertyneen lumen määrä eri lämpötiloissa (Kloow & Jenstav 2006).

Kuvassa 3.5 kertyneen lumen ja jään määrä on lajiteltu neljään eri ryhmään, joista $A < B < C < D$. Ryhmässä D lunta on kertynyt junan alustaan eniten. Tässä ryhmässä lämpötila on ollut keskimäärin $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ alapuolella ja päivittäinen lumisateen määrä on yleensä ylittänyt 30 mm.

Samassa tutkimuksessa tarkasteltiin junan alustaan kertyneen lumen ja jään massaa ja tiheyttä. Kuvassa 3.6 on esitetty kertyneen lumen massan ja tiheyden yhteys eri lumityypeillä.



Kuva 3.6. Kertyneen lumen massan ja tiheyden yhteys eri lumityypeillä (Kloow & Jenstav 2006).

Kuvasta 3.6 huomataan, että junan alustaan kertyneen lumen ja jään tiheys vaihtelee välillä $150\text{--}900\text{ kg/m}^3$. Jään tapauksessa tiheys on lähellä 900 kg/m^3 . Suurin lumimassa, joka tutkimuksen (Railway Technical Research Institute 2004) mukaan voi pudota yhtenäisenä junan alustasta, painaa noin 15 kg. Jos tällaisen 15 kg painavan lumimassan tiheys on 500 kg/m^3 , on lumimassan tilavuus tällöin $0,03\text{ m}^3$. Lunta voi siis pudota junan alustasta hyvinkin suuria määriä kerralla.

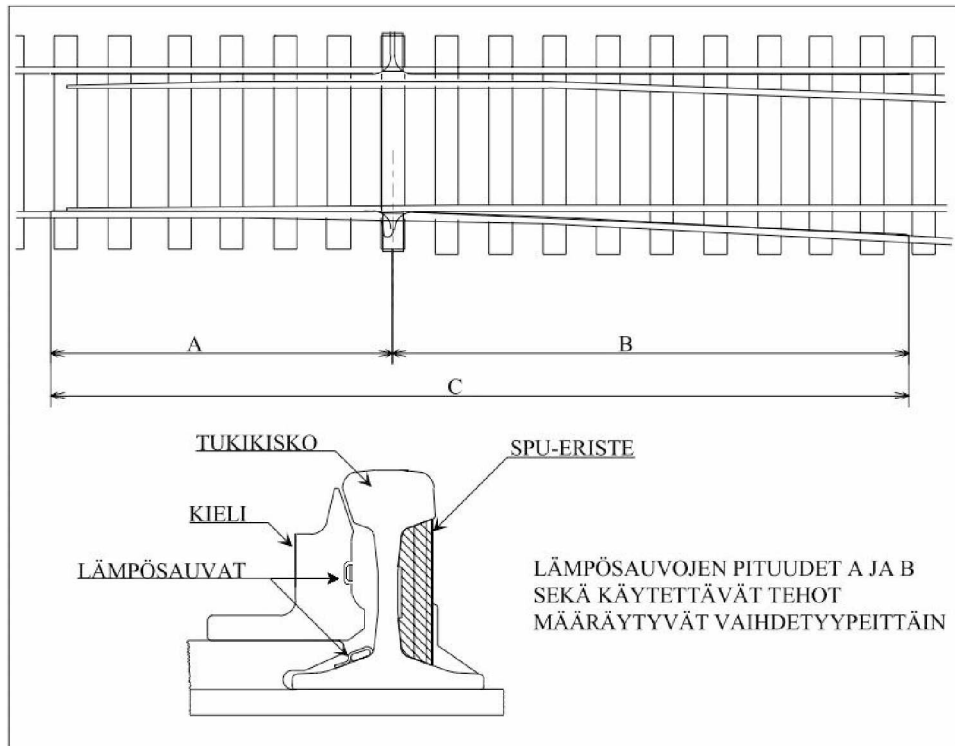
3.4 Lumen poisto vaihteista

Vaihteiden toimintahäiriöt kuuluvat talvella yleisimpiin ongelmatekijöihin raideliikenteessä. Usein häiriöt johtuvat lumen kerääntymisestä vaihteen kielen ja tukikiskon väliin, jolloin vaihde ei pääse liikkumaan halutulla tavalla. Lumen kerääntymistä voidaan yrittää estää tai lunta voidaan poistaa vaihtealueelta erilaisilla menetelmillä. Erityisen tärkeää on saada lumi poistettua vaihteen kielen ja tukikiskon välistä.

3.4.1 Lämmitys

Suomessa yli puolessa rataverkon vaihteista on käytössä vaihteiden lämmitysjärjestelmä. Kiskoja lämmitetään vastuksilla, jotka saavat sähkönsä yleensä suoraan ratajohdosta vaihteenlämmitysmuuntajan avulla. Lämpösaumat asennetaan kuvan 3.7 mukaisesti tukikiskon jalan yläosaan kielen puolelle ja usein myös kieleen koneistettuun uraan. Osa lämmöstä siirtyy tukikiskoon johtumalla, ja osa siirtyy tukikiskon

ja vaihteen kielen väliin säteilemällä. Tukikiskon ulkopuolelle asennettavat lämpöeristeet pienentävät lämpöä haihduttavaa pinta-alaa. (Ratahallintokeskus 2000.)



Kuva 3.7. Lumensulatuslaitteet (muokattuna lähteestä Ratahallintokeskus 2000).

Lämmitys ei yksinään ole toimiva ratkaisu lumen poistamiseksi vaihteista, sillä jatkuva lämmitys aiheuttaa kiskon pintaan kosteutta, joka nimenomaan kerää kulkeutuvaa lunta. Lumen kulkeutumista vaihteeseen tulisikin rajoittaa vaihteenlämmityksen yhteydessä esimerkiksi lumiaitojen tai lumenohjaimien avulla. Lisäksi lämmityksen käyttöä tulee rajoittaa vain tarpeellisiin tilanteisiin. Lämmitys ei myöskään pysty yksinään puhdistamaan vaihdetta kovalla lumisateella. Vaihteen puhdistamiseen tarvitaan tällöin myös harjausta. Vaihteen toiminnan varmistamiseksi olisi suositeltavaa puhdistaa koko vaihde lumesta, ja tämän lisäksi vielä noin 20 metrin matkalta vaihteen molemmin puolin. (Kloow & Jenstav 2006.)

Lämmitys ei auta myöskään junasta vaihteen kielen ja kiskon väliin pudonneiden jääpalasten tapauksessa. Jääpala on vain pieneltä osalta kiinni lämmitetyssä kiskossa, joten sen sulaminen kestää pitkään. Tämän vuoksi jääpalasten poisto mekaanisesti vaihteen kielen ja kiskon välistä on tarpeellista. (Kloow & Jenstav 2006.)

3.4.2 Vaihteen kielen suojareuna

Yksi ratkaisu rautatievaihteiden talviongelmiiin on estää lumen ja jään pääsy vaihteen kielen ja tukikiskon väliin. Tämä voisi onnistua joustavan suojareunan avulla, joka tulisi esiin aina vaihteen kielen ollessa auki. Suojareuna siirtyy kiskoprofiilin alle vaihteen ollessa kiinni (kuva 3.8).



Kuva 3.8. Vaihteen joustava suojareuna, joka siirtyy kiskoprofiilin alle vaihteen kielen ollessa kiinni (Idéus konsultteknik HB 2010, Kloowin 2011 mukaan).

Kuvan 3.8 mukainen ratkaisu on kehitteillä Ruotsissa. Suojareunan on tarkoitus estää yli kulkevasta junasta irtoavan lumen ja jään päätyminen vaihteen kielen ja tukikiskon väliin. Toisaalta suojareuna myös helpottaa vaihteen mekaanista puhdistamista harjalla, sillä vaihteen kielen ja tukikiskon välille ei jää hankalaa kapeaa rakoa. (Kloow 2011.) Kuvasta ei käy selvästi ilmi, miten tukikisko sijoittuu suojareunan kohdalla.

3.4.3 Muut menetelmät

Mekaaninen poisto on varmin keino lumen poistoon vaihteista, mutta se vaatii paljon henkilöresursseja. Mekaaninen poisto tarkoittaa käytännössä lumen harjausta, lapiointia tai lumiharja- tai lumilinkityökoneiden käyttöä. Ahtaalla ratapihalla mekaanisen poiston ongelma on lumen varastointipaikkojen riittämättömyys.

Paineilmalaitteita voidaan käyttää lumen poistoon esimerkiksi kannettavilla puhtaak-sipuhalluslaitteilla, kuten Tampereen alueella on tehty (Resiina-lehti 2008). Puhaltimia varten tarvittava paineilma kehitetään raiteiden välissä olevilla kompressoreilla.

Lumisuojat suojaavat vaihteen kääntö- ja tarkastustankoja lumelta ja jäältä. Suojien materiaalina on Suomessa käytössä vesivaneri, alumiini ja lujitemuovi (Ratahallintokeskus 2000). Suojat estävät lumen pakkautumisen niihin kohtiin, jotka ovat vaihteen toiminnan kannalta kriittisiä. Lumisuojat kuitenkin hajoavat tai irtoavat helposti etenkin nopeista junista putoavan lumen ja jään ja junien aiheuttamien ilmavirtauksien seurauksena.

Lumiharjat on kehitetty ratkaisemaan lämmityksen yhteydessä ilmennyt pölyävän lumen tarttumisongelma. Lämmitys sulattaa lunta, ja pölyävä lumi tarttuu herkästi sulaneen kiskon kostealle pinnalle. Harjat kiinnitetään kuvan 3.9 mukaisesti ratapölkkyihin kiskon suuntaisesti, ja ne vähentävät pölyävän lumen pääsyä vaihteen kielen ja tukikiskon väliin. (Smith 2010.)



Kuva 3.9. Lumiharja (Kloow & Jenstav 2006)

Lumispoilerit sijoitetaan kiskon suuntaisesti vaihteen kielen kohdalle. Kumista valmistetun spoilerin yläreuna on noin 100 mm kiskon selän yläpuolella, sillä spoilerin tarkoituksena on nostaa pölyävää lunta ylöspäin. Tämän ansiosta pölyävä lumi ei laskeudu vaihteen kielen ja tukikiskon väliin. (Kloow & Jenstav 2006.)

Lumen sulatusvaunu on suunniteltu ahtaille ratapihoille, joissa ei ole tilaa lumen au-raamiseen ja säilytykseen. Lumi kerätään raiteelta ja siirretään sulatusvaunuun, jonka jälkeen sulanut lumi voidaan valuttaa viemäriin tai imeytyskenttään. Vaunun vaatima lämmitysteho on suuri. (Salmenperä & Nurmikolu 2012.)

3.5 Menetelmät lumen kerääntymisen ehkäisemiseksi

Jään kerääntymistä junan teliin ja alusrakenteisiin kannattaa vähentää mahdollisimman paljon. Yleisesti ottaen pyöreät pinnat ja matalakitkaiset pinnat ovat suositeltavia, sillä ne keräävät vähemmän lunta ja jäätä. Tasaisia pintoja, jotka liikkuvat toisi-aan kohti, tulisi välttää. Tällaisissa väleissä lumi pakkautuu helposti tiiviimmäksi. (Kloow & Jenstav 2006.)

3.5.1 Jäänestoaineet

Jäänestoaineet laskevat nesteen jäätymispistettä ja estävät siten jään muodostumisen nesteeseen. Aineet ehkäisevät jään kerääntymistä junan rakenteisiin ja nopeuttavat jo muodostuneen jään irtoamista kalustosta. Jäänestoaineena käytetään pohjoismaissa propyleeniglykolia. Propyleeniglykolin jäätymispiste on $-59\text{ }^{\circ}\text{C}$, joten sen sekoittaminen veteen laskee veden jäätymispistettä huomattavasti nollan asteen alapuolelle.

Talvella 2009–2010 juniin kertyneen jään sulatukseen käytettiin Suomessa vesisulatusta kuumalla vedellä, sillä kalusto piti saada nopeasti sulatettua ja uudelleen käyttöön. Tämä ei kuitenkaan ole toimiva ratkaisu pidemmällä aikavälillä, ja siksi tällöin syntyi ajatus glykolisulatuslaitteiston hankkimisesta Suomeen. (Liikennevirasto 2010.)

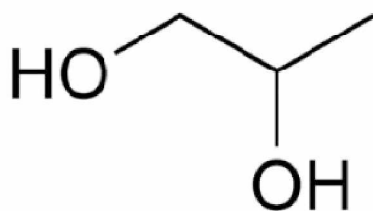
Vuonna 2010 Ilmalan varikolle Helsinkiin hankittiin glykolisulatuslaitteisto estämään lumen kiinnittymistä sekä jään muodostusta vaunujen alustoihin. Propyleeniglykolivesiliuosta ruiskutetaan junan alustaan ja valumat kerätään talteen valuma-altaisiin uudelleenkäyttöä varten (kuva 3.10). (VR Group 2011.)



Kuva 3.10. Ilmalan ratapihalla sijaitseva jäänestolaite ruiskuttaa jäänestoainetta junan alustaan (Ilta-Sanomat 2011).

Jäänestoaineiden käyttö on ajallisesti hyvin tehokasta, sillä yhden telin käsittely jäänestoaineella vie vain noin 40 sekuntia. Jäänestoaaineet ovat myös kustannustehokkaita, sillä käytetystä jäänestoaineesta noin 90 % käytetään uudelleen. (Kloow & Jenstav 2006.)

Propyleeniglykoli (kuva 3.11) koostuu pyöreistä molekyyleistä, kun taas lumimolekyylit ovat teräväreunaisia. Tämän vuoksi lumi ei tartu helposti propyleeniglykoliin. Lisäksi on havaittu, että viskositeettinsa ansiosta propyleeniglykoli ei ajaudu yhtä helposti junan alustan pieniin nurkkiin kuin vesi. (Kloow & Jenstav 2006.)



Kuva 3.11. Propyleeniglykolin molekyyli rakenne.

Propyleeniglykoli on kuitenkin vesiliukoista, joten se irtoaa sateella helposti junan alustasta.

3.5.1 Muut menetelmät

Alustan ja telien kotelointiratkaisut estävät lumen kerääntymisen alustan rakenteisiin. Suojauksen tarkoituksena on myös vähentää alustaan iskeytyvästä sepelistä, lumesta ja jäästä syntyviä vaurioita. Kotelointi ei kuitenkaan estä kaasumaisen veden härmis-

tymistä kuurajääksi alustassa. Kloowin ja Jenstavin (2006) mukaan koteloinnit voivat haitata lumen sulatusta huoltohalleissa ja toisaalta myös kerätä lunta tavallista enemmän, sillä suljetut rakenteet etenkin telissä keräävät lunta enemmän kuin avoimet rakenteet.

Liikkuvia rakenteita voi myös suojata taipuisilla plekseillä, jolloin kertyvä jää putoaa pois pleksin muodonmuutoksien myötä.

Telien lämmityspotket asennetaan teleihin niihin kertyvän lumen ja jään sulattamiseksi. Putkissa kierrätetään sulatusvettä junan ollessa varikolla. Putket kohdennetaan telien kallistusjärjestelmien lämmittämiseen, sillä niiden toiminnassa on ollut talvi-aikaan ongelmia. (Alstom 2011.)

Jäätä hylkivät materiaalit ovat käytössä ilma- ja meriliikenteessä. Jäätä hylkivät materiaalit voivat olla erilaisia pinnoitteita, kuten maaleja. Pinnoitteen ja jään välinen adheesiolujuus on hyvin pieni, joten jää irtaantuu itseensä jääkerroksen kasvettua tarpeeksi suureksi. Jäätä hylkivän pinnoitteen ongelma on se, että se irtaantuu ja huuhtoutuu pinnalta helposti pois. Viime aikoina on kuitenkin kehitetty uudenlaisia pinnoitteita, joiden pysyvyys on esitetty paremmaksi. Tällaiset pinnoitteet voivat tuoda uusia ratkaisukeinoja myös raideliikenteen lumi- ja jääongelmiin. (Salmenperä & Nurmikolu 2012.)

Jäänpoistokengät on yleisesti käytetty ratkaisu lentokoneiden siipien jääongelmissa. Jään poisto perustuu paineilman avulla muotoaan muuttaviin tuubeihin: muodonmuutos irrottaa suurimman osan tuubien päälle muodostuneesta lumesta ja jäästä. Kengät muodostuvat useista vierekkäin sijoitetuista tuubeista, ja ne voidaan muotoilla alustan mukaan. Jäänpoistokenkien huonoja puolia ovat korkea hinta ja paino. Lisäksi ne vahingoittuvat herkästi.

3.6 Menetelmät lumen irrottamiseksi kalustosta

Lunta ja jäätä kertyy junakalustoon jäänestomenetelmistä huolimatta. Lumiongelmiin vähentämiseksi tuleekin huomioida myös ne menetelmät, joilla jo kertynyt lumi ja jää saataisiin irrotettua kalustosta.

Lunta ja jäätä putoaa vaihdealueelle vaihteen epäjatkuvuuskohdan aiheuttaman heijastuksen johdosta. Nyt tarkastellaan menetelmiä, joilla lumen ja jään saisi pudotettua hallitusti vaihdealueen ulkopuolella.

3.6.1 Raiteen epäjatkuvuuskohta

Vuonna 2011 testattiin kiskoon tehdyn epäjatkuvuuskohdan vaikutusta lumen ja jään irrottamiseen junakalustosta (Junnikkala & Untinen 2011). Kiskoon hiottiin suoralla raideosuudella kolme paria uria (kuva 3.12), ja tämän jälkeen tarkkailtiin lumen irtaantumista urien yli ajaneista junista.



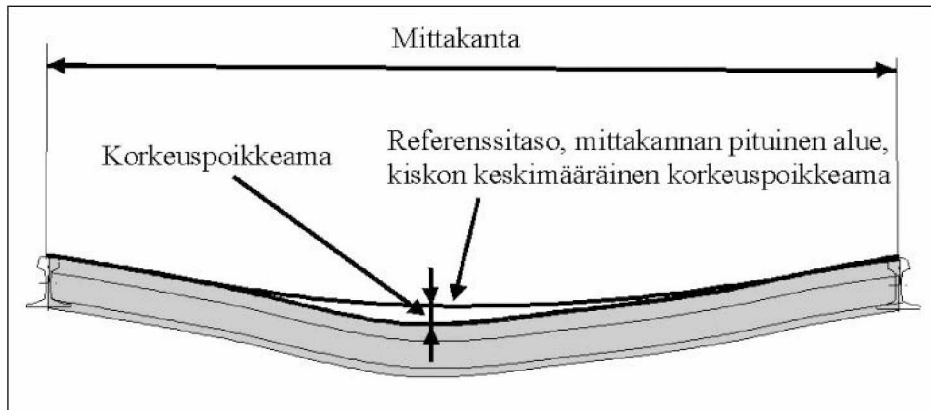
Kuva 3.12. Kiskoon hiottu ura (Junnikkala & Untinen 2011).

Kokeen aikana ei havaittu kaluston alustarakenteista irtoavan lunta tai jäää urien aiheuttamien herätteiden takia. Mittauspaikka kuitenkin sijaitsi kahden vaihdealueen välissä, joten helpoiten irtoava lumi ja jää on todennäköisesti irronnut jo vaihdealueella ennen mittauspaikkaa. (Junnikkala & Untinen 2011.)

Ratateknisissä ohjeissa on tarkat määräykset kiskojen geometrian ja tasaisuuden suhteen. Ohjeista löytyvät esimerkiksi kiskon korkeuspoikkeamien, kierouden ja kallistuksen raja-arvot. Nämä määräykset vaikuttavat oleellisesti siihen, millaisia lumen irrotukseen tarkoitettuja epäjatkuvuuskohtia kiskoihin voidaan suunnitella. Mitattaville suureille on määritetty virheluokat eri kunnossapitotasoille (Ratahallintokeskus 2004). Virheluokat on jaoteltu virheen vakavuuden mukaan:

- C-luokan virhe on alkava virhe
- D-luokan virhe on sisällytettävä kunnossapitosuunnitelmaan ja korjattava lähitulevaisuudessa
- ★ – luokan virhe on välittömästi korjattava virhe

Korkeuspoikkeama on kiskon kulkupinnan korkeussuuntainen (z-suuntainen) poikkeama verrattuna keskimääräiseen kiskon korkeustasoon (kuva 3.13) (Ratahallintokeskus 2004).



Kuva 3.13. Korkeuspoikkeama (Ratahallintokeskus 2004).

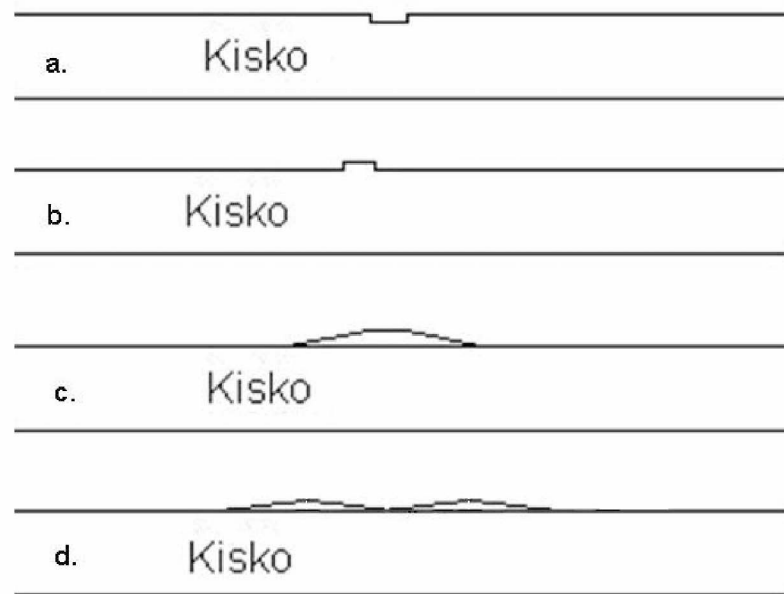
Taulukossa 3.1 on esitetty, millaisia korkeuspoikkeamia kiskossa sallitaan. Raja-arvot on esitetty 5 metrin tulostuskannalle.

Taulukko 3.1. Korkeuspoikkeamien raja-arvot [mm], tulostuskanta 5 metriä (Ratahallintokeskus 2004).

Virheluokka	Kunnossapitotaso							
	1AA	1A	1	2	3	4	5	6
C	3	3	4	5	6	8	9	10
D	5	5	6	7	8	10	13	15
★	8	8	9	11	12	15	19	21

Esimerkiksi korkeuspoikkeama kunnossapitotasolla 1A saa olla virheluokassa C ai-noastaan 3 mm. Tämä tarkoittaa maksimissaan 3 millimetrin poikkeamaa keskimää-räisestä kiskon korkeustasosta 5 metrin matkalla. Kiskoon tehty epäjatkuvuuskohta ei siis saa juurikaan poiketa kiskon keskimääräisestä korkeustasosta. Myös raiteen kal-listuksen ja kierouden raja-arvot rajoittavat raiteeseen tehtävän epäjatkuvuuskohdan geometriaa.

Kiskoon loveamalla tehdyn epäjatkuvuuskohdan sijaan on myös tarkasteltu kohoaa kiskoissa (Salmenperä & Nurmikolu 2012). Tällöin kiskoista ei tarvitse poistaa materiaalia, vaan kiskon päälle voitaisiin asentaa eräänlainen kiskopomppu. Erilaiset kiskopomppun muodon hahmotelmat näkyvät kuvassa 3.14.



Kuva 3.14. Erilaisia kiskopompon muotoja (Salmenperä & Nurmikolu 2012).

Vaihtoehto (a) kuvaa jo aiemmin kokeiltua lovea kiskossa. Koska kiskoja ei haluta vaurioittaa, lovea vastaava vaikutus saataisiin lisäämällä kiskon päälle kohoama (b). Yliajavat pyörät pyöristäisivät kohoaman reunoja, jolloin päädyttäisiin malliin (c). Toisaalta suurempi pyöriin kohdistuva iskuvoima saataisiin sijoittamalla kaksi pompua peräkkäin (d), jolloin kulmamuuutos ja siten myös iskuvoima kasvaisi.

3.6.2 Muut menetelmät

Kiskon aaltokorrugaatio on kiskossa tietyllä aallonpituudella toistuva muotovirhe. Korrugaatio synnyttää värähtelyjä, joiden taajuus on korrugaation aallonpituuden ja junan nopeuden funktio. Mikäli muotovirheen aiheuttaman herätteen taajuus vastaa telirakenteen ominaistaajuutta, telirakenteen ominaisvärähtely voimistuu ja syntynyt resonanssi saattaa irrottaa junasta lunta ja jäätä.

Radan täristys voisi irrottaa junasta lunta ja jäätä siten, että kiskoihin ei tarvitsisi tehdä rakenteellisia muutoksia. Kiskoja voitaisiin täristää sähkömotorisella täristimellä esimerkiksi ennen huoltohalliin ajamista, jolloin lumen sulatus ennen huoltoa helpotuisi. (Salmenperä & Nurmikolu 2012.)

4 Junakaluston värähtely ja herätteet

Koneiden ja rakenteiden värähtely on yleensä haitallista, ja värähtelyn hallitsemiseksi on tärkeää selvittää rakenteen ominaisaajuudet ja niitä vastaavat värähtelymuodot. Junakaluston värähtely voi aiheuttaa vaurioita sekä junakalustolle että kiskolle. Lisäksi vaihteiden epäjatkuvuuskohtien aiheuttama värähtely voi irrottaa junan alustasta lunta, joka voi pudota vaihteen kielen ja tukikiskon väliin estäen vaihteen liikkeen. Toisaalta junakaluston värähtelyä voidaan myös hyödyntää, sillä oikealla kohdalla aiheutettu värähtely voi irrottaa lunta sopivasti esimerkiksi ennen vaunun huoltoa. Värähtelyanalyysin avulla saadaan selville junakalustossa tapahtuvien värähtelyiden suuruus ja värähtelytaajuus, ja niiden avulla voidaan tehdä arvioita värähtelyn haitallisuudesta.

Värähtelyksi kutsutaan kappaleen jaksollisesti toistuvaa liikettä. Liike toistuu värähtelyssä tietyn määrääjän välein joko täysin tai melkein samanlaisena. Värähtelyt jaetaan kahteen ryhmään: ominaisvärähtelyihin ja pakkovärähtelyihin. Tämän lisäksi värähtelyt voidaan jakaa vaimenemattomiin ja vaimeneviin. Värähtely voi olla täysin vaimenematonta vain teoriassa, jolloin systeemillä ei ole ulkoista eikä sisäistä kitkaa. Käytännössä todellisen systeemin värähtelyt ovat kuitenkin aina vaimenevia, sillä systeemi ei ole koskaan täysin kitkaton. Kun systeemiin ei vaikuta lainkaan ulkoisia herätevoimia, värähtelyn amplitudi pienenee lopulta vaimennuksen seurauksena nolaksi. (Salmi & Virtanen 2006.)

4.1 Värähtelyn teoriaa

Ominaisvärähtely kuvaa mekaanisen systeemin liikettä silloin, kun se liikkuu ilman ulkoisten voimien vaikutusta. Ominaisvärähtely alkaa, kun systeemi poikkeutetaan stabiilista tasapainoasemastaan. Tämän jälkeen systeemin palautusvoimat yrittävät palauttaa systeemin takaisin tasapainoasemaan, jolloin syntyy jaksoittain toistuva tasapainoaseman suhteen edestakainen liike. Jokainen ominaisvärähtely tapahtuu sille ominaisella taajuudella, jota kutsutaan ominaistajuudeksi. Ominaisvärähtelymuodot ja -taajuudet riippuvat systeemin jäykkyys- ja hitausominaisuuksista. (Salmi & Virtanen 2006.)

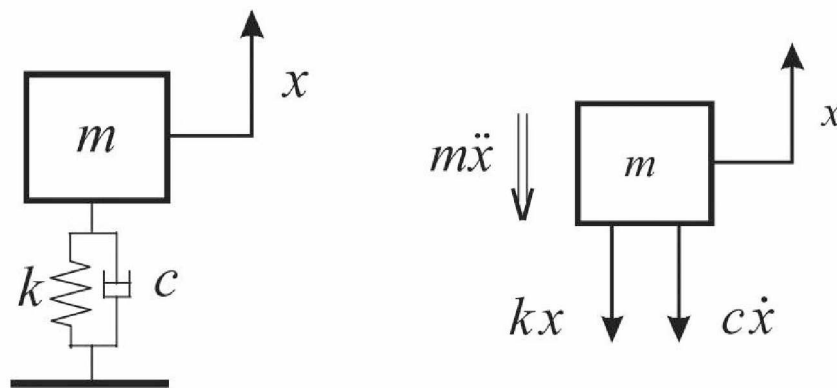
Pakkovärähtely kuvaa mekaanisen systeemin liikettä silloin, kun siihen vaikuttavat palautusvoimien lisäksi ulkoiset voimat. Nämä ulkoiset voimat pakottavat systeemin värähtelemään, jolloin syntyvää liikettä kutsutaan pakkovärähtelyksi. Systeemiin vaikuttavaa pakkovoimaa kutsutaan myös systeemin herätteeksi. (Salmi & Virtanen 2006.)

Todellista värähtelevää systeemiä kuvataan yleensä yksinkertaistetulla matemaattisella mallilla. Mallin tarkoituksena on esittää kaikki todellisen systeemin osat, jotka vaikuttavat oleellisesti systeemin värähtelykäyttäytymiseen. Matemaattinen malli koostuu massoista, jousista ja vaimentimista, joiden arvot vastaavat mahdollisimman tarkasti todellista systeemiä. Matemaattiset mallit rakennetaan usein pistemäisistä massoista ja hitausmomenteista sekä näitä yhdistävistä jousista ja vaimentimista. Tällaista mallia kutsutaan diskreetiksi malliksi. Diskreetti malli kuvaa systeemin massa-, jäykkyys- ja vaimennusominaisuuksia keskitettyinä erillisille osille. Jatkuvassa mallissa sen sijaan ominaisuudet ovat jakaantuneet jatkuvasti osan koko alueelle. (Lähteenmäki 2007.)

Mallissa systeemille määrätään myös sen vapausasteiden eli liikesuuntien lukumäärä. Todellisuudessa rakenteella on ääretön määrä vapausasteita, mutta laskentamallissa vapausasteiden määrä on rajattu. Vapausasteiden määrää lisäämällä mallista saa tarkemman, mutta samalla laskenta muuttuu vaativammaksi.

4.1.1 Liikkeyhtälöt

Systeemin värähtelyliikettä voidaan kuvata liikkeyhtälöillä, joissa on mukana systeemin massa-, jäykkyys- ja vaimennusarvot. Lisäksi liikkeyhtälöiden muodostamiseksi tarvitaan tietoa systeemiin vaikuttavista voimista. Liikkeyhtälöistä saadaan ratkaistua systeemin värähtelykäyttäytyminen. Yksinkertaisimmillaan värähtelevää systeemiä voidaan kuvata yhden vapausasteen diskreetillä mallilla (kuva 4.1). Yhden vapausasteen mallissa systeemin paikka voidaan ilmaista yhden koordinaatin x avulla.



Kuva 4.1. Yhden vapausasteen värähtelymalli ja vapaakappalekuva.

Vapaakappalekuvan perusteella mallille voidaan muodostaa liikkeyhtälö (Thomson 1989):

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (4.1)$$

missä

m on massa

k on jousivakio

c on vaimennuskerroin

x on siirtymä

Tällaisen yhden vapausasteen vaimentamattoman systeemin ominaistaajuus on

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.2)$$

Kuvan 4.1 mukaisen yhden vapausasteen vaimennetun systeemin ominaistaajuus on

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{1 - \xi^2} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.3)$$

Kaavassa 4.3 suhteellinen vaimennuskerroin ξ saadaan kaavalla 4.4:

$$\xi = \frac{\sigma}{2\sqrt{km}} \quad (4.4)$$

Systeemin yleinen n-vapausasteinen liikeyhtälö voidaan muodostaa kaavan 4.5 mukaan

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (4.5)$$

missä

$[M]$ on systeemin massamatriisi ($n \times n$)

$[C]$ on systeemin vaimennusmatriisi ($n \times n$)

$[K]$ on systeemin jäykkyyssmatriisi ($n \times n$)

$\{F\}$ on systeemin voimavektori ($n \times 1$)

$\{x\}$ on systeemin asemavektori ($n \times 1$)

Kun kyseessä on ominaisvärähtely, systeemiin ei vaikuta ulkoisia voimia. Tällöin liikeyhtälö saa muodon (4.6):

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (4.6)$$

Liikeyhtälöryhmässä on systeemin vapausasteiden mukainen määrä liikeyhtälöitä. Jatkuvalle mallille kuvatus systeemin dynaamista liikettä kuvaavat liikeyhtälöt ovat osittaisdifferentiaaliyhtälöitä, joiden ratkaiseminen analyyttisesti on usein hyvin haastavaa. Ainoastaan yksinkertaisimmissa tapauksissa systeemin analyyttinen ratkaisu onnistuu melko helposti. Jos systeemiä kuvataan diskreetillä mallilla, liikeyhtälöt ovat tavallisia differentiaaliyhtälöitä, joiden ratkaisu onnistuu helpommin. (Lähtenmäki 2007.)

Myös systeemin vapausasteiden lukumäärä vaikuttaa oleellisesti laskennan vaativuuteen. Systeemin värähtelyanalyysin laatimisessa onkin otettava huomioon, mikä on paras suhde systeemin tarkkuuden ja analyysin vaatiman ajankäytön suhteen.

4.1.2 Ominaistaajuudet ja -muodot

Vaimentamattoman n-vapausasteisen systeemin ominaistaajuudet saadaan laskettua systeemin massa- ja jäykkyyssmatriisien avulla ominaisarvotehtävänä kaavan 4.7 mukaisesti:

$$\det([K] - \lambda_n[M]) = 0 \quad (4.7)$$

Tässä ominaisarvon λ_n , ominaiskulmataajuuden ω_n ja ominaistaajuuden f_n yhteys on:

$$\lambda_n = \omega_n^2 = (2\pi f_n)^2 \quad (4.8)$$

Ominaisarvotehtävästä ratkaisuna saadaan rakenteen ominaisarvot λ_n ja samalla siis ominaistaajuuudet f_n . Oinaismuodot φ_n saadaan laskettua vastaavasti eri ominaistaajuuksille vektorimuotoisina:

$$(\mathbf{K} - \lambda_n \mathbf{M}) \varphi_n = 0 \quad (4.9)$$

Ominaisvektori $\{\varphi\}$ kuvaa rakenteen ominaismuotoa eli sitä värähtelymuotoa, jolla rakenne vastaavalla ominaistaajuudella värähtelee. Oinaismuodoilla ei ole absoluuttista suuruutta, vaan ominaisvektorit kuvaavat vain liikkeen suhteellista suuruutta toisiin vapausasteisiin nähden.

Vaimennetun n-vapausasteisen systeemin ominaismuotojen laskeminen on huomattavasti vaikeampaa. Diskreetin mallin liikeyhtälö on toisen asteen differentiaaliyhtälö, joka tulee muokata ensimmäisen asteen differentiaaliyhtälöksi. Vaimennetun systeemin liikeyhtälö voidaan muokata esimerkiksi seuraavanlaiseen muotoon (Tongue 1996):

$$[\mathbf{B}] \dot{\mathbf{Y}} - [\mathbf{A}] \mathbf{Y} = \{\mathbf{0}\} \quad (4.10)$$

Liikeyhtälössä

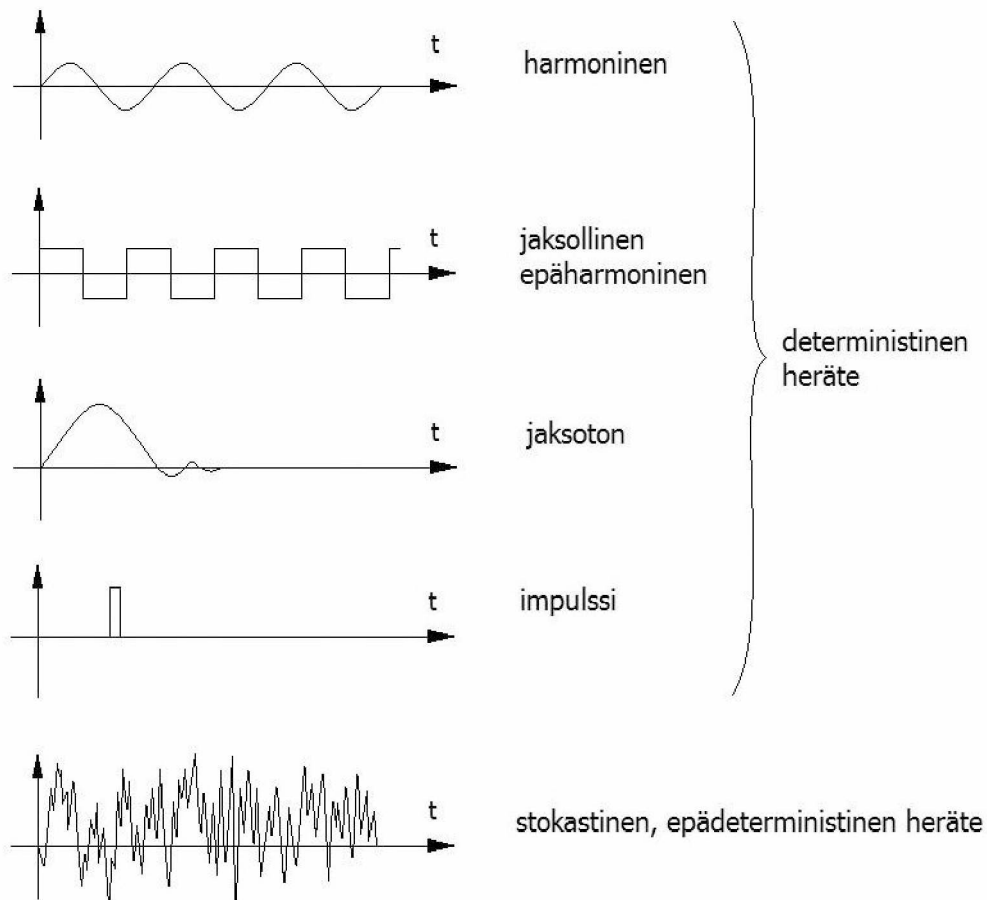
$$[\mathbf{B}] = \begin{bmatrix} -[\mathbf{K}] & [\mathbf{0}] \\ [\mathbf{0}] & [\mathbf{M}] \end{bmatrix} \quad [\mathbf{A}] = \begin{bmatrix} [\mathbf{0}] & -[\mathbf{K}] \\ -[\mathbf{K}] & -[\mathbf{C}] \end{bmatrix} \quad \mathbf{Y}^T = \{x_1 \dots x_n \dot{x}_1 \dots \dot{x}_n\}$$

Kun liikeyhtälö on muokattu ensimmäisen asteen differentiaaliyhtälöksi, siitä saadaan laskettua valmisohjelmalla systeemin ominaismuodot ja -taajuuudet.

4.1.3 Herätteet

Värähtelyanalyysissä vaikuttavat ulkoiset kuormitukset eli herätteet voidaan luokitella deterministisiin ja epädeterministisiin herätteisiin. Deterministinen heräte noudattaa jotain tiettyä funktiota, joka voidaan määrittää jokaisena ajanhetkenä. Esimerkiksi harmoninen sinimuotoinen heräte on deterministinen. Epädeterministinen eli satunnaisheräte on epäsäännöllinen eikä sitä voida kuvata minkään funktion avulla. Satunnaisherätteen aiheuttamaa värähtelyä kutsutaan stokastiseksi värähtelyksi. (Salmi & Virtanen 2006.)

Kuvassa 4.2 on esitetty erilaisia herätefunktioita. Herätefunktiot on jaoteltu deterministisiin ja epädeterministisiin herätteisiin. Kaksi ylintä herätettä ovat lisäksi jaksollisia. Kun heräte vaikuttaa vain lyhyen aikaa, sitä kutsutaan transienttikuormitukseksi. Transienttikuormitus saavuttaa nopeasti maksimiarvonsa ja aiheuttaa systeemiin lyhytaikaisen liiketilan. Esimerkiksi kuvan 4.2 impulssiheräte kuvaa jaksotonta transienttikuormitusta.



Kuva 4.2. Erilaisia herätefunktioita.

Matemaattisessa mallissa herätteen tulee olla tarkkaan määritetty, ja heräte ilmoitetaan aina funktion tai funktioiden summan avulla. Tässä onkin rajoitettu tarkastelemaan matemaattiseen malliin soveltuvia deterministisiä herätteitä ja erityisesti jaksollisia herätteitä. Jaksollinen heräte voidaan aina esittää Fourier-sarjana, jolloin sarjan jokaista termiä voidaan käsitellä harmonisena. Fourierin sarjakehitelmä voidaan laskea kaavan 4.11 avulla (Rao 1995):

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (4.11)$$

Kaavassa 4.11 vakio a_0 on tarkasteltavan funktion keskiarvo ja vakiot a_n ja b_n ovat kertalukua n olevan harmonisen komponentin amplitudit:

$$a_0 = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} F(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} F(t) \cos n\omega t dt$$

$$b_n = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} F(t) \sin n\omega t dt$$

missä

ω on herätteen alin ominaiskulmataajuus

τ on herätteen jaksonaika

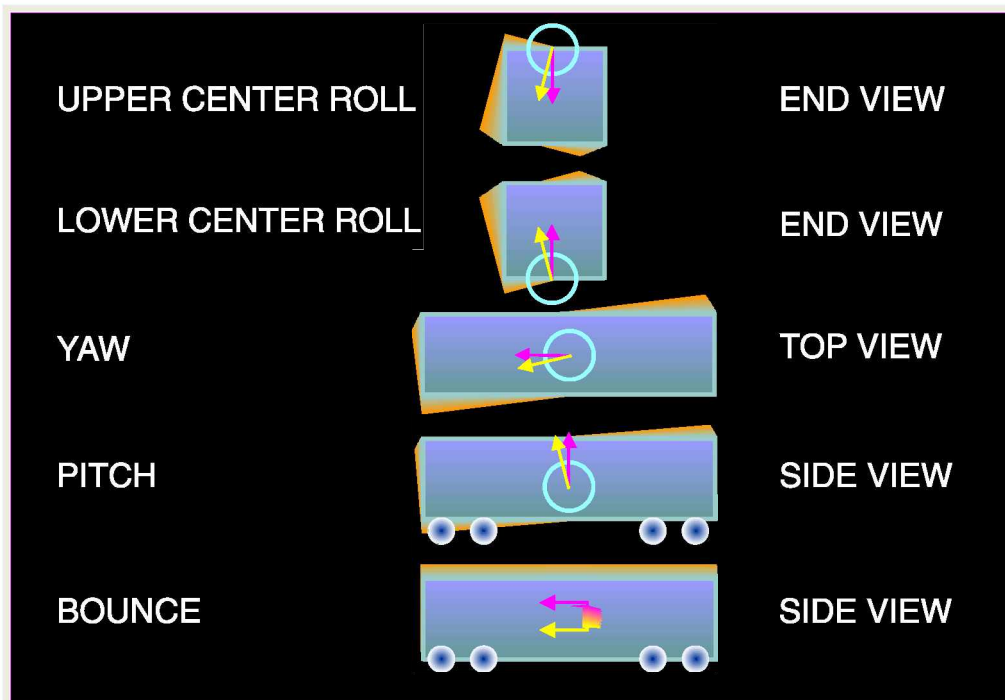
Kun jaksollinen heräte esitetään Fourier-sarjana, yhden vapausasteen liikeyhtälö saa muodon:

$$mx'' + cx' + kx = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (4.12)$$

Fourier-sarjan avulla jaksollinen kuormitus voidaan esittää harmonisten herätteiden summana, mikä auttaa herätteen aiheuttaman vasteen selvittämisessä. Vasteella tarkoitetaan systeemin siirtymä-, nopeus- ja kiihtyvyysvektoreita, joiden arvot ovat ajasta riippuvia. Usean vapausasteen vaimennetuissa systeemeissä vasteen selvittäminen laskennallisesti on kuitenkin hankalaa tai jopa mahdotonta ilman laskentaohjelmien apua.

4.2 Junakaluston värähtelykäyttäytyminen

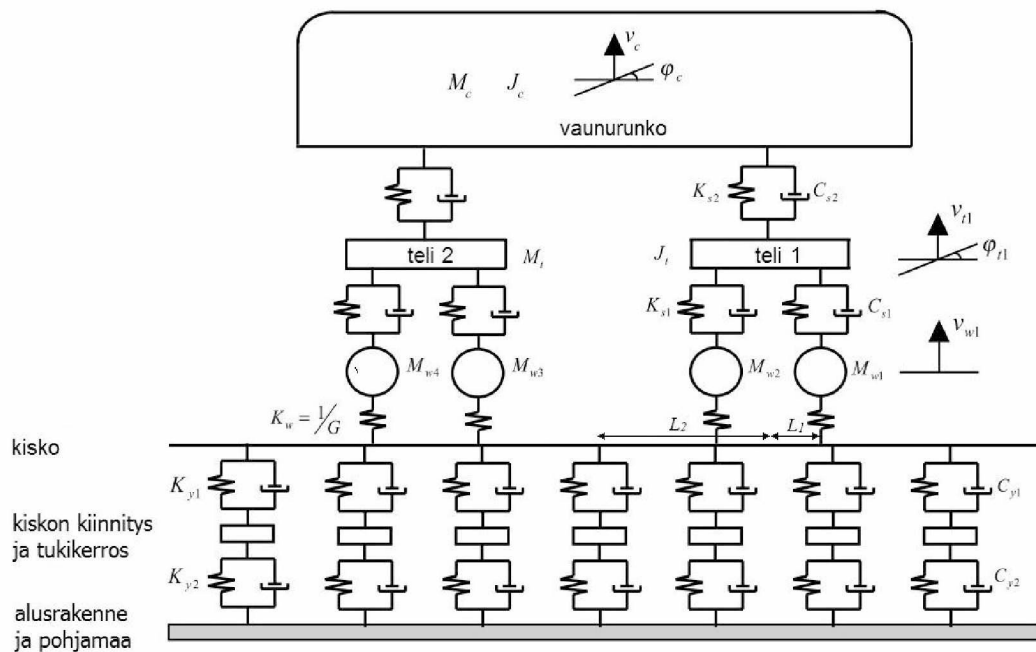
Kokonaisen nivelöidyn junakaluston värähtelykäyttäytyminen on hyvin monimutkainen ilmiö, joten tässä yhteydessä on keskitytty vain yksittäisen vaunun värähtelymalliin. Kuvassa 4.3 on esitetty yksittäisen vaununrunгон perusvärähtelymuodot ja niiden nimitykset. Värähtelymuodot ovat jäykän kappaleen ominaismuotoja kaksiakseliselle tai kaksiteliselle vaunulle. Vaunun jousituksella on merkittävä vaikutus vaununrunгон värähtelymuotoihin.



Kuva 4.3. Vaunurungon ominaisvärähtelymuodot (Transportation Technology Center Inc. 2010). Englanninkieliset värähtelymuotojen nimitykset ovat vakiintuneet käyttöön Suomessa.

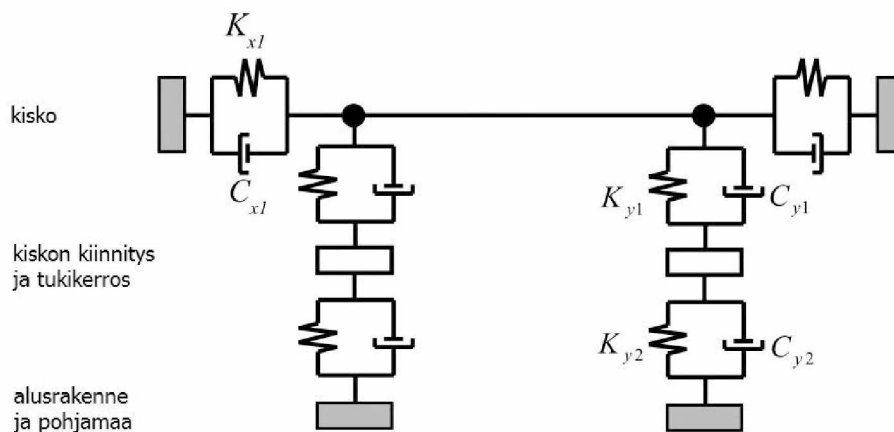
Kuvassa 4.3 ylimpinä näkyvät vaunun roll-värähtelymuodot, joissa värähtely tapahtuu edestakaisena kiertymisliikkeenä vaunun pitkästä akselista. Värähtelyihin vaikuttavat vaunun massa, hitausmomentti pituusakselin suhteen, vaunun painopisteen pystysuuntainen sijainti, jousituksen vaaka- ja pystysuuntainen jäykkyys ja vaimennus sekä pystysuuntaisten jousien sivuttaissuuntainen etäisyys. Yaw-värähtelymuodossa vaunu värähtelee kuvan 4.3 mukaan pystyakselin ympäri tapahtuvalla edestakaisella värähtelyliikkeellä. Värähtelyyn vaikuttavat tällöin vaunun massa, vaunun hitausmomentti pystyakselin suhteen, jousituksen vaakasuuntainen jäykkyys ja vaimennus sekä telien keskinäinen etäisyys. Lisäksi värähtelyyn vaikuttavat telien ja vaunurungon välinen kiertojäykkyys, vaimennus ja kitka. Kuvan 4.3 toiseksi alimmaisessa kohdassa vaunu värähtelee pitch-muodossa kiertymällä vaaka-akselin ympäri. Värähtelyyn vaikuttavat vaunun massa, hitausmomentti vaaka-akselin suhteen, pystysuuntaisen jousituksen jäykkyys ja vaimennus sekä telien keskinäinen etäisyys. Alimpana kuvassa 4.3 on esitetty bounce-muoto, jossa vaunu värähtelee pystyakselin suuntaisesti. Tähän värähtelymuotoon vaikuttavat pääasiassa vaunun massa, jousituksen pystysuuntainen jäykkyys sekä vaimennus. (Hakulinen et al. 2012.)

Junakaluston värähtelymallissa huomioidaan pyöräkerran ja telin sekä telin ja vaunurungon väliset jousitukset ja vaimennukset. Värähtelymallin vapausasteet voidaan valita eri tavoin. Kuvassa 4.4 on esitetty yksi esimerkki junakaluston värähtelymallista. Esimerkin värähtelymallissa vapausasteiksi on valittu vaunun, pyöräkertojen ja telien pystysuuntaiset siirtymät v sekä vaunun ja telien kulmamuuтокset φ .



Kuva 4.4. Junan värähtelymalli (muokattuna lähteestä Lei & Noda 2002).

Kuvan 4.4 värähtelymallissa on mukana myös kiskon, tukikerroksen ja alusrakenteen osuus, joiden jäykkyys- ja vaimennusominaisuudet kytkeytyvät vaunurungon liikkeisiin raiteen ja pyörän välisten kosketusvoimien kautta. Kiskoja käsitellään mallissa palkkeina. Radan osuus värähtelymallista käy tarkemmin ilmi kuvasta 4.5. (Lei & Noda 2002.)



Kuva 4.5. Ratarakenteen värähtelymalli (muokattuna lähteestä Lei & Noda 2002).

Kuvissa 4.4 ja 4.5:

K_{x1} , K_{y1} on kiskon kiinnityksen ja tukikerroksen yhdistetty jäykkyys x- ja y-suunnissa

C_{x1} , C_{y1} on kiskon kiinnityksen ja tukikerroksen yhdistetty vaimennus x- ja y-suunnissa

K_{y2} , C_{y2} on radan alusrakenteen ja pohjamaan jäykkyys ja vaimennus

K_{s1} , C_{s1} on pyörän ja telin välinen jäykkyys ja vaimennus

$$[C] = \begin{bmatrix} 2C_{s2} & 0 & -C_{s2} & 0 & -C_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2L_1^2 C_{s2} & -L_1 C_{s2} & 0 & L_1 C_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2C_{s1} + C_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{s1} & -C_{s1} & 0 & 0 & 0 \\ 2L_1^2 C_{s1} & 0 & 0 & 0 & -C_{s1} L_1 & -C_{s1} L_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2C_{s1} + C_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{s1} & -C_{s1} & 0 & 0 \\ 2L_1^2 C_{s1} & 0 & 0 & 0 & -C_{s1} L_1 & -C_{s1} L_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \text{symm.} & & & & C_{s1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & C_{s1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & C_{s1} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & C_{s1} & 0 & 0 \\ & & & & & & & & C_{s1} & 0 \\ & & & & & & & & & C_{s1} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Matriiseihin sijoitetaan vaunurungon, pyörien ja telien massa-, jäykkyys- ja vaimennusominaisuudet. Arvot vaihtelevat käytetyn kaluston mukaisesti, ja esimerkiksi matkustaja- ja tavaravaunun ominaisuudet eroavat yleensä selvästi toisistaan.

4.2.1 Matkustajavaunu

Seuraavaksi tarkastellaan esimerkkien avulla matkustaja- ja tavaravaunujen massa-, jäykkyys- ja vaimennusominaisuuksia. Esimerkkeinä käytettyjä vaunutyyppejä on tarkasteltu TTY:n ratarakennetutkimuksissa jo aiemmin Hakulinen et al. (2012) toimesta. Matkustajavaunun esimerkkinä on käytetty Ex-vaunua eli yksikerroksista IC-vaunua. Vaunun tietoja on kerätty taulukkoon 4.1. Taulukossa ensiöjousituksella tarkoitetaan pyöräkerran ja telin välistä jousitusta ja toisiöjousituksella telin ja vaunurungon välistä jousitusta.

Taulukko 4.1. Ex-vaunun ominaisuuksia (Hakulinen et al. 2012).

Vaunun massa	46000 kg
Telin massa	6380 kg
Pyöräkerran massa	1250 kg + laakeripesä 2×49 kg
Jarrulevyjen massa	500 kg
Jousittamaton kokonaismassa	1900 kg pyöräkertaa kohti
Ensiöjousituksen jousivakio	919 N/mm (pyörää kohti)
Ensiöjousituksen vaimennus (oletettu lineaariseksi)	1000N / 0,2m/s
Toisiojousituksen jousivakio	206,6 N/mm (sisä) 250 N/mm (ulko)
Toisiojousituksen vaimennus	2500N / 0,2m/s (pystysuora) 6000N / 0,3m/s (vaakasuora)
Pyörän halkaisija	uutena 920 mm, kuluneena 840 mm
Telikeskiöväli	19 m
Telin pyöräkertojen välinen etäisyys	2,56 m

Ex-vaunun värähtelymalli vastaa kuvan 4.4 värähtelymallia, jossa vaunurungon ja telien sekä telien ja pyöräkertojen välillä on jousitus.

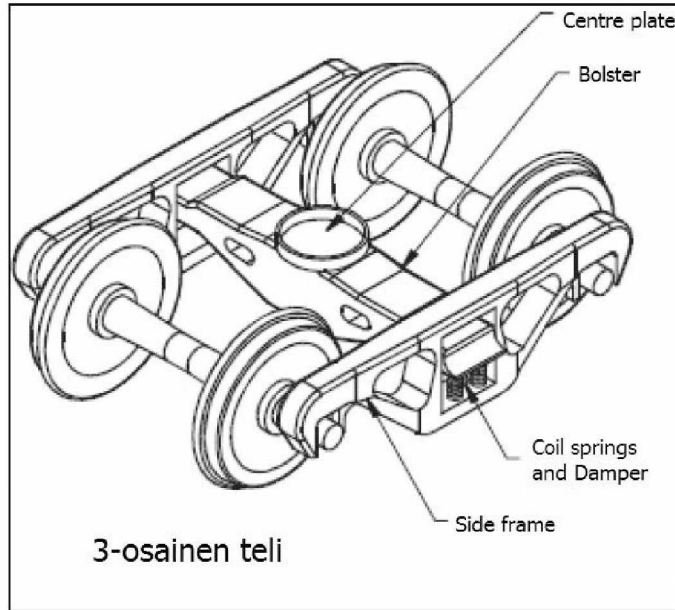
4.2.2 Tavaravaunu

Tavaravaunun esimerkkinä on käytetty idän liikenteen Vok-vaunua, joka on korkealaitainen avovaunu. Vaunun tiedot on kerätty taulukkoon 4.2.

Taulukko 4.2. *Vok-tavaravaunun ominaisuuksia (Hakulinen et al. 2012).*

Vaunun massa	tyhjänä 22000kg, lastattuna 88000kg
Telin massa	4680 kg
Telin sivupalkin massa	500 kg
Telin keskiöpalkin massa	3680 kg
Pyöräkerran massa	1230 kg laakeripesineen
Jousittamaton kokonaismassa	1650 kg
Kokonaisjäykkyys (yhdelta puolelle)	3,85 MN/m
Kokonaisvaimennus, kiilaelementti	kiilan kulma 45°, kitkakerroin 0,4
Pyörän halkaisija	957 mm
Telikeskiöväli	8,65 m
Telin pyöräkertojen välinen etäisyys	1,8 m

Vok-vaunussa on kolmiosisaiset telit, joten sen värähtelymalli poikkeaa kuvassa 4.4 esitetystä värähtelymallista. Kolmiosisaisessa telissä käytetään yleensä vain toisiojousitusta, joka tarkoittaa telin keskiö- ja sivupalkin (*bolster, sideframe*) välillä vaikuttavaa telin sisäistä jousitusta (kuva 4.6).



Kuva 4.6. 3-osaisen telin rakenne (Guidelines to best practices... 2001).

Kolmiosaisen telin sivupalkit on kiinnitetty yleensä jousittamattomasti akseliin. Tämä aiheuttaa teliin suuremman jousittamattoman massan. Vaimennuksessa käytetään kiilaelementtejä, jolloin telin vaimennusominaisuudet muuttuvat kitkan ansiosta kuormituksen mukaan.

4.2.3 Oinaismuotojen laskeminen

Luvussa 4 esitettiin aiemmin junakaluston vaimennettu värähtelymalli ja kyseiseen malliin liittyvät massa-, jäykkyys- ja vaimennusmatriisit. Matriisien muodostamista varten tarvitaan tietoa junakaluston massoista, jousituksista, vaimennuksista ja perusgeometriasta, eli telikeskiövälistä ja telin pyöräkertojen välisestä etäisyydestä. Nämä tiedot on esitetty sekä matkustaja- että tavaravaunulle taulukoissa 4.1 ja 4.2. Lisäksi aiemmin käytiin läpi vaimennetun systeemin ensimmäisen asteen differentiaaliyhtälöksi muokattu liikeyhtälö:

$$[B]\dot{Y} - [A]Y = \{0\} \quad (4.18)$$

Liikeyhtälössä

$$[B] = \begin{bmatrix} -[K] & [0] \\ [0] & [M] \end{bmatrix} \quad [A] = \begin{bmatrix} [0] & -[K] \\ -[K] & -[C] \end{bmatrix} \quad Y^T = \{x_1 \dots x_{10} \dot{x}_1 \dots \dot{x}_{10}\}$$

Koska kuvassa 4.4 esitetyssä värähtelymallissa on kymmenen vapausastetta, ovat kaikki värähtelymalliin liittyvät matriisit 10×10 -matriiseja. Jos kyseisen värähtelymallin ominaismuodot halutaan ratkaista liikeyhtälön 4.18 avulla, muodostuu liikeyhtälössä mukana olevista matriiseista $[B]$ ja $[A]$ jo 20×20 -matriiseja. Matriisien koon vuoksi ominaisarvot ja -vektorit saadaan helpoiten laskettua käyttämällä jonkin matematiikkaohjelman ominaisarvoratkaisijaa. Vaimennuksen vuoksi voidaan lisäksi olettaa, että ominaisvektoreista tulee kompleksisia.

Matkustajavaunun esimerkkinä käytetty Ex-vaunu vastaa rakenteeltaan kuvassa 4.4 esitettyä värähtelymallia. Kun taulukon 4.1 matkustajavaunun arvot sijoitetaan massa-, jäykkyys- ja vaimennusmatriiseihin 4.15–4.17 ja tämän jälkeen muodostetaan liikeyhtälössä 4.18 tarvittavat matriisit $[A]$ ja $[B]$, saadaan selville matkustajavaunun ominaisvärähtelymuodot. Ominaisvärähtelymuodot on laskettu Matlabin ominaisarvoratkaisijalla.

Koska ominaisarvoratkaisijaan sijoitetut matriisit ovat 20×20 -matriiseja, saadaan ratkaisijasta ulos ominaisvektoreista koostuva 20×20 -matriisi sekä ominaisarvot kertova 20×20 -matriisi. Alkuperäisen liikeyhtälön vapausasteita vastaavat ominaisarvot ja -vektorit saadaan ottamalla näistä matriiseista ensimmäinen 10×10 -lohkomatriisi, joka koostuu alkuperäisen matriisin kymmenestä ensimmäisestä rivistä ja sarakkeesta. Nämä ositetut matriisit kuvaavat värähtelymallin kymmenen siirtymävapausasteen ominaisvärähtelymuotoja ja -taajuuksia.

Laskussa saadut ominaisvektorit sisältävät kompleksilukuja, joten ne kannattaa muuttaa reaalisiksi. Ominaismuodoilla ei ole absoluuttista suuruutta, ja ominaisvektorin alkio kuvaa vain yhden vapausasteen suhteellista liikettä suhteessa muihin vapausasteisiin. Tämän vuoksi ominaisvektori voidaan kertoa millä tahansa luvulla. Kun ominaisvektori kerrotaan luvulla $e^{-i\phi}$, missä ϕ on vektorin vaihekulma reaaliakselin suhteen, saadaan vektori muutettua reaaliseksi.

Myös ominaisarvot ovat kompleksilukuja. Ne ominaisarvot, jotka ovat toistensa liittolukuja, voidaan yhdistää. Näin saadaan sini- ja kosinimuotoiset ratkaisut. (Tongue 1996.) Ominaisaajuudet saadaan laskettua ominaisarvoista kaavasta 4.8 johdetun kaavan 4.19 avulla.

$$\omega = \frac{\sqrt{A^2 - B^2}}{2B} = \frac{\omega_n}{2B} \quad (4.19)$$

Ominaisarvot ja ominaisaajuudet on lueteltu taulukossa 4.3. Matlab antaa ominaisarvot kompleksitasossa muodossa $\lambda = u + iv$, sillä se olettaa differentiaaliyhtälön ratkaisujen olevan muotoa $x = X e^{\lambda t}$. Kaikkien ominaisarvojen reaaliosa on negatiivinen, mikä tarkoittaa liikkeen vaimenevan ajan myötä. Ominaisaajuudet lasketaan ominaisarvojen imaginaariosista, jotka kuvaavat kappaleen sinimuotoista värähtelyä $\sin(\omega t)$.

Taulukko 4.3.

Värähtelymallista lasketut ominaisarvot ja -taajuuudet.

i	i:s ominaisarvo λ_i	i:s ominaistajuus f_i (1/s)
1	-0,0344	0,02952
2 ja 3	-0,8713±7,9871i	1,27117
4 ja 5	-14,1329±29,4634i	4,68925
6 ja 7	-5,0085±39,4108i	6,27242
8 ja 9	-4,7252±40,0121i	6,36811

Seuraavassa on esitetty ominaistajuuksia vastaavat ominaisvektorit (4.20–4.24). Ominaisvektorit on kerrottu siten, että suurimman alkion arvo on yksi.

$$u_1 = \{0.3905 \quad -0.0332 \quad 0.0654 \quad -0.0996 \quad 0.6957 \quad -0.2369 \quad -0.0493 \quad 0.1801 \quad 0.3913\}^T \quad (4.20)$$

$$u_2 = u_3 = \{1 \quad 0 \quad -0.00359 \quad 0 \quad -0.00359 \quad 0 \quad -0.0502 \quad -0.0502 \quad -0.0496 \quad -0.0496\}^T \quad (4.21)$$

$$u_4 = u_5 = \{0.9798 \quad 0.0018 \quad 0.9943 \quad 0.0036 \quad 0.9653 \quad 0.0039 \quad 1 \quad 0.9907 \quad 0.9593 \quad 0.9694\}^T \quad (4.22)$$

$$u_6 = u_7 = \{0.982 \quad 0.0032 \quad 0.9969 \quad 0.0038 \quad 0.9673 \quad -0.0038 \quad 1 \quad 0.9905 \quad 0.9642 \quad 0.9736\}^T \quad (4.23)$$

$$u_8 = u_9 = \{0.4187 \quad 0 \quad 0.069 \quad 0 \quad 0.067 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0.9976 \quad 0.9976\}^T \quad (4.24)$$

Ominaisvektoreista u_2 ja u_3 , u_4 ja u_5 , u_6 ja u_7 sekä u_8 ja u_9 ovat toistensa liittovektoreita. Niitä vastaavat ominaisarvot ovat siksi toistensa liittolukuja. Ominaisarvoista laskettujen ominaistajuuksien arvoja ja dynamiikkaohjelmalla laskettuja ominaistajuuksia on verrattu toisiinsa luvussa 6. Lisäksi ominaismuotoja voidaan verrata kuvassa 4.3 esitettyihin vaunurungon ominaisvärähtelymuotoihin. Esimerkiksi ominaisvektorit u_2 ja u_3 kuvaavat selvästi bounce-värähtelymuotoa, jossa vaunu värähtelee pystyakselin suunnassa. Tämän voi päätellä vaunun pystysuuntaista siirtymää kuvaavan ensimmäisen vapausasteen arvosta, joka on selvästi suurempi kuin muiden vapausasteiden arvot.

4.3 Kaluston ja radan välisen dynamiikan mallintaminen

Aiemmin käsiteltiin junakaluston värähtelykäyttäytymistä erillään radan värähtelystä. Radan värähtelykäyttäytyminen vaikuttaa kuitenkin pyörän ja kiskon kontaktivoimien kautta oleellisesti myös kaluston värähtelyihin. Raiteen epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat iskuvoimia junakaluston pyöriin ja toimivat siten heräteinä junakaluston värähtelyssä.

4.3.1 Radan värähtelyominaisuudet

Kiskon ja kaluston värähtelymallissa rataa voidaan yksinkertaisimmillaan kuvata pelkästään pyörän ja radan välisen jäykkyyden avulla. Ratarakenne voidaan tällöin mallintaa kimmoisasti tuetuilla palkeilla. (Hakulinen et al. 2012.) Kuvan 4.5 ratarakenteen värähtelymalli on monimutkaisempi, sillä siinä on huomioitu erikseen kiskon kiinnityksen ja tukikerroksen jäykkyys- ja vaimennusominaisuudet pysty- ja sivuttaissuunnissa sekä radan alusrakenteen ja pohjamaan jäykkyys- ja vaimennusominaisuudet. Taulukossa 4.4 on listattu radan jäykkyys- ja vaimennusarvoja.

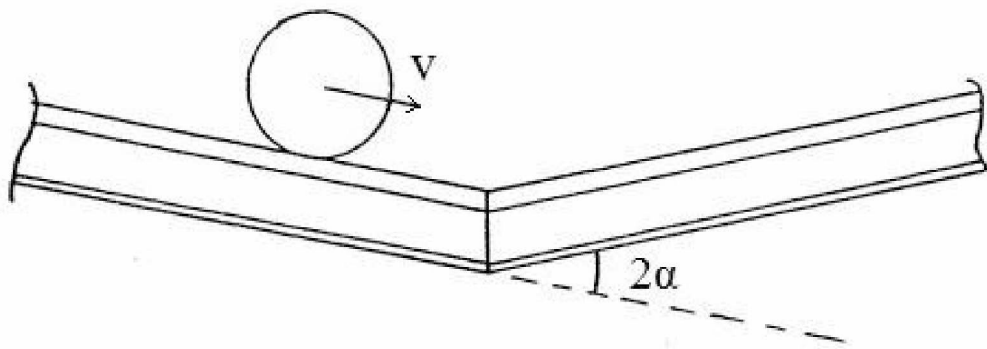
Taulukko 4.4. Radan jäykkyys- ja vaimennusarvoja. Hakulinen et al. (2012) ovat koonneet arvot eri lähteistä.

Kiskojen ja pölkkyjen välinen pystysuuntainen jäykkyys (Zw 900 NT... 1997)	95 MN/m
Kiskojen ja pölkkyjen välinen pystysuuntainen vaimennus (Li et al. 1999)	34 kN/(m/s)
Kiskojen ja pölkkyjen välinen sivuttaissuuntainen jäykkyys (Li et al. 1999)	70 MN/m
Kiskojen ja pölkkyjen välinen sivuttaissuuntainen vaimennus (Li et al. 1999)	34 kN/(m/s)
Yhden pölkyn ja ratapenkereen välinen kokonaisjäykkyys (Li et al. 1999; Kolisoja et al. 2000)	72 MN/m
Pölkkyjen ja maan välinen kokonaisvaimennus yhdelle pölkylle (Li et al. 1999)	50 kN/(m/s)

Ratarakenteen malli muodostetaan aina tarkasteltavan ongelman mukaan. Esimerkiksi raiteen epäjatkuvuuskohtien tarkastelussa junakaluston liike tapahtuu lähinnä pystysuunnassa, joten kiskon sivuttaissuuntaisilla ominaisuuksilla ei ole suurta merkitystä. Toisaalta vaihteet ja kisko jatkokset, jotka sijaitsevat tiukassa kaarteessa, voivat aiheuttaa myös merkittäviä sivuttaissuuntaisia dynaamisia voimia junakalustoon (Schmid et al. 2010).

4.3.2 Iskuvoimat P_1 ja P_2

Epäjatkuvuuskohta raiteessa aiheuttaa junan pyöriin herätteen, jota voidaan kuvailla iskuvoimien P_1 ja P_2 avulla. P_1 -voima on staattisen pyörävoiman ja korkeataajuisen dynaamisen voiman yhdistelmä. Korkeataajuinen dynaaminen voima syntyy epäjatkuvuuskohdissa pyörän ja kiskon liikkua toisiaan kohti. P_2 -voima kuvaa staattisen pyörävoiman ja matalataajuisen dynaamisen voiman yhdistelmää. Matalataajuinen dynaaminen voima syntyy pyörän, kiskon ja ratapölkkyjen liikkua yhtenä kokonaisuutena alaspäin radan alusrakenteessa. Iskuvoimien suuruuden on kuvattu olevan suoraan verrannollinen junan nopeuteen ja kiskon kulmamuuтокseen epäjatkuvuuskohdassa (kuva 4.7). Esimerkiksi kiskojoatkosta voidaan kuvata kulmamuuтокsella $\varnothing = 20 \text{ mrad}$ eli $\varnothing = 1,15^\circ$ (Schmid et al. 2010). Voimiin vaikuttavat myös vaunun, pyöräkertojen ja radan ominaisuudet.

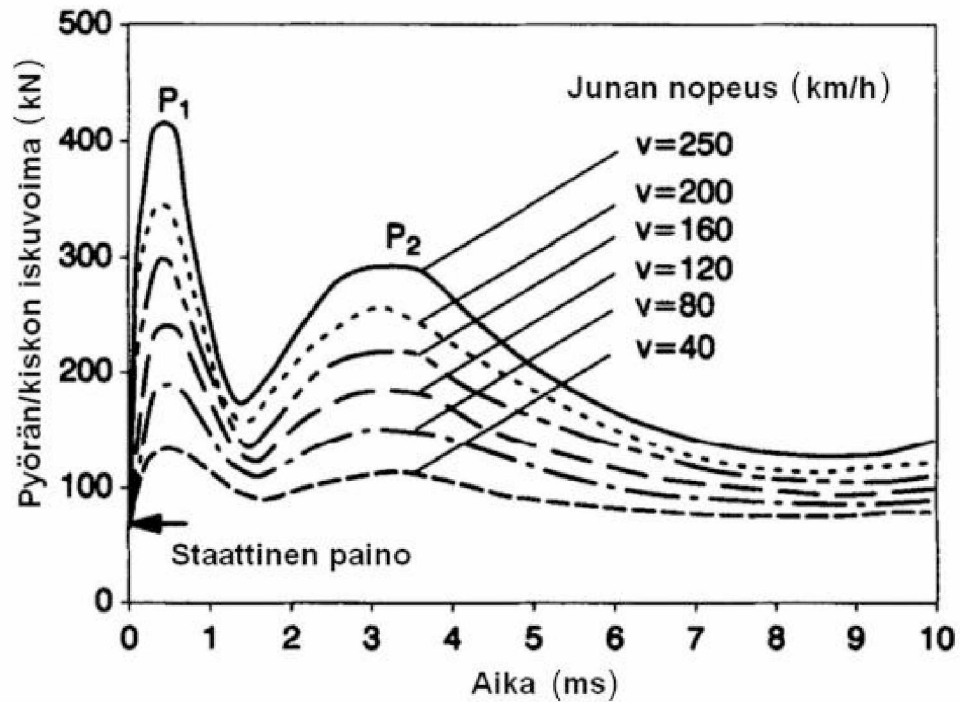


Kuva 4.7. Kiskon kulmamuuтокs epäjatkuvuuskohdassa (Salmenperä & Nurmikolu 2012).

Iskuvoimista P_1 on aina taajuudeltaan selvästi korkeampi kuin P_2 . Tyypilliset värähtelytaajuudet iskuvoimille ovat (Schmid et al. 2010):

- P_1 , taajuus yli 200 Hz
- P_2 , taajuus 30–100 Hz

Kuvassa 4.8 on esitetty kiskojoatkosten painumakohtien aiheuttamat iskuvoimat ajan suhteen junan eri nopeuksilla. Kuvasta erottaa selvästi, että iskuvoimista P_1 on suurempi ja lyhytkestoisempi kuin P_2 . Lisäksi P_1 -voima vaikuttaa ennen P_2 -voimaa.



Kuva 4.8. Kiskojaatkosten painumakohdista aiheutuvat P_1 - ja P_2 -voimat (Zhai & Cai 1997).

Kuvasta 4.8 käy ilmi, että iskuvoimien suuruus nousee merkittävästi junan nopeuden kasvaessa. Iskuvoiman ensimmäisen piikin aiheuttaa korkeataajuuksinen P_1 -voima, jota Schmid et al. (2010) kuvailevat kaavalla 4.25:

$$P_1 = \alpha V \sqrt{\frac{k_H m_2}{1 + m_2/m_u}} \quad (4.25)$$

Seuraavan piikin aiheuttaa taajuuodeltaan matalampi P_2 -voima, jota voidaan kuvata kaavalla 4.26 (Schmid et al. 2010):

$$P_2 \approx 0.7 \alpha V \sqrt{k_t m_u} \quad (4.26)$$

Kaavoissa 4.25 ja 4.26

α on lovikulma

V on junan nopeus

k_H on Hertzin kontaktijäykkyys

m_e on efektiivinen radan massa

k_t on pyöräkerran yhdistetty jäykkyys

m_u on vaunun jousittamaton massa

Molemmissa tapauksissa iskuvoimiin vaikuttavat kiskon kulmamuutos, junan nopeus sekä vaunun jousittamaton massa. Lisäksi P_1 -voiman määrittämiseen tarvitaan radan massan sekä Hertzin kontaktijäykkyyden arvot ja P_2 -voiman määrittämiseen pyöräkerran yhdistetty jäykkyys.

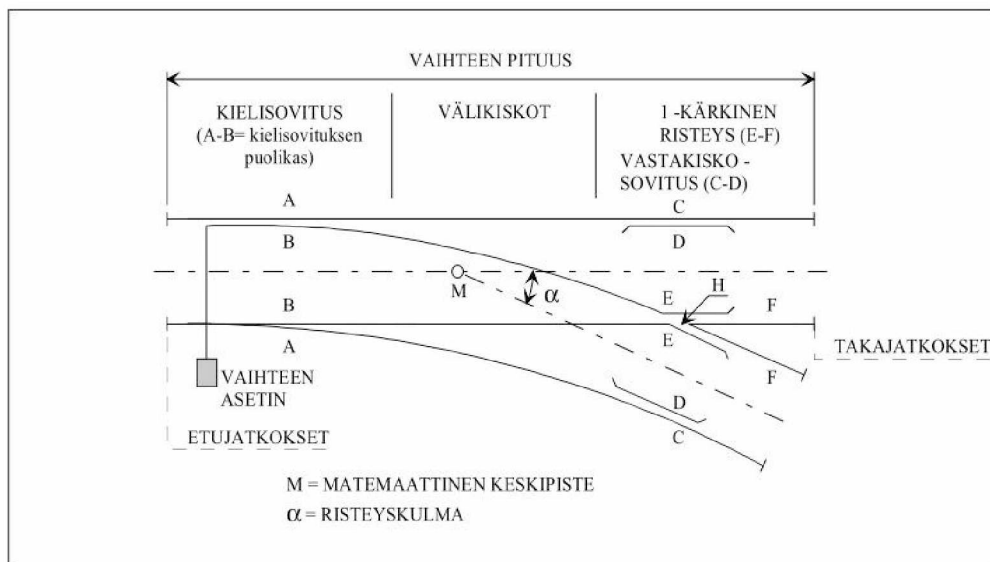
P_2 -iskuvoiman suuruutta voidaan alentaa pienentämällä junan nopeutta, kiskon kulmamuuutosta, vaunun jousittamatonta massaa tai pyöräkerran yhdistettyä jäykkyyttä. P_1 -voiman alentaminen ei ole yhtä helppoa, sillä radan massaa ja Hertzin kontaktijäykkyyttä on vaikea kontrolloida. (Iwnicki 2003; Schmid et al. 2010.) Iskuvoimia P_1 ja P_2 sekä niihin liittyviä raja-arvoja on käsitellyt tarkemmin Sampaala (2011) diplomityössään.

4.4 Vaihteen mallintaminen

Rautatievaihteen mallintaminen on melko monimutkainen prosessi, joka käydään tässä vain pääpiirteittäin läpi. Mallintamisprosessi voidaan jakaa neljään osa-alueeseen (Minnis 2010):

- radan geometrian mallintaminen
- kiskoprofiilin mallintaminen
- pyörä-kisko-kontaktin mallintaminen
- radan jousto-ominaisuuksien arviointi

Radan geometrian mallinnus tarkoittaa käytännössä vaihdetyypistä riippuen erilaisien mittojen määrittämistä vaihteesta. Tyypillinen yksinkertainen rautatievaihte on esitetty kuvassa 4.9. Kuvasta nähdään vaihteen pääosat, joiden sijainti ja mitat tulee tietää radan geometrian mallintamisessa.

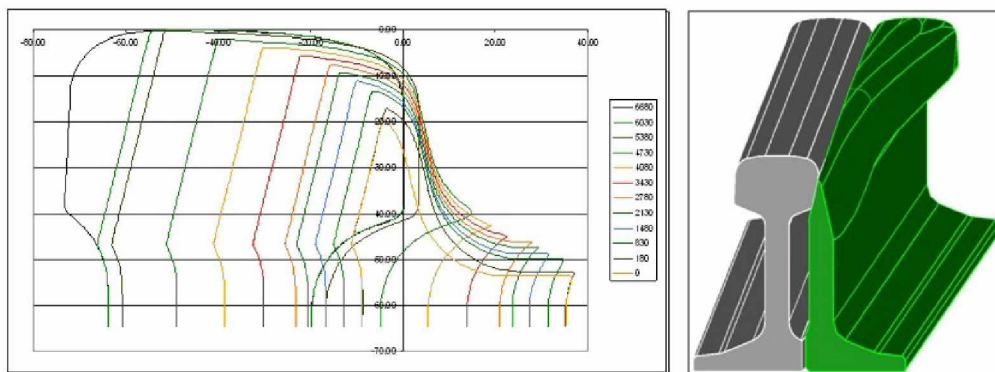


Kuva 4.9. Rautatievaihteen pääosat (Ratahallintokeskus 2000).

Kuvassa 4.9 vaihteen muut osat ovat seuraavat (Ratahallintokeskus 2000):

- A on tukikisko
- B on kieli (kielet muodostavat yhdessä tukikiskojen kanssa kielisovituksen)
- C on vastakiskojen tukikisko
- D on vastakisko (vastakiskot muodostavat yhdessä vastakiskon tukikiskon kanssa vastakiskosovituksen)
- E on siipikisko (siipikiskot muodostavat yhdessä kärkikiskojen kanssa 1-kärkisen risteyksen)
- F on kärkikisko (kärkikiskot muodostuvat risteyksen kärkiosasta ja siihen hitsatuista jatkekiskoista)
- M on vaihteen matemaattinen keskipiste
- H on risteyksen matemaattinen risteyspiste, risteyksen kulkureunojen leikkauspiste
- ☒ on risteyskulma, joka ilmaistaan usein tangenttina, esim. 1:9

Rautatievaihteen mallinnuksessa tulee tietää vaihteen eri osien tarkka geometria. Tämä tarkoittaa sitä, että radan geometriatietojen lisäksi vaaditaan tietoa myös rata-kiskon profiilista. Ratakiskon profiili voidaan mitata mittalaitteella, ja tämä tieto voidaan siirtää suoraan mallinnusohjelmaan. Tämä on helpoin tapa ilmoittaa kiskon profiilitiedot vaihteessa, sillä kiskon profiili muuttuu vaihdealueella merkittävästi. Kiskon profiilin muuttuminen vaihteen kielen sulautuessa tukikiskoon on esitetty kuvassa 4.10.



Kuva 4.10. Ratakiskon profiili ja geometria vaihteessa (Minnis 2010).

Vaihteen mallintamisen kolmantena osana tulee selvittää kiskon ja pyörän väliset kontaktivoimat. Jotta kontaktivoimat saadaan selville, tulee kiskoprofiilin lisäksi olla tiedossa myös pyörän profiili sekä akselikuormitus.

Lisäksi joissain tapauksissa voi olla tarpeellista kiinnittää erityishuomiota raiteen jousto-ominaisuuksiin. Raiteen jousto-ominaisuuksilla on suuri vaikutus kiskon ja pyörän välillä vaikuttaviin dynaamisiin voimiin. Ominaisuudet voivat muuttua selvästi vaihteen eri kohdissa, ja tätä voidaan mallintaa muuttamalla raiteen jousto-ominaisuuksia vaihteen eri osissa.

5 Tutkimusmenetelmät

Vaihteen epäjatkuvuuskohta aiheuttaa junaan herätteen, jonka on todettu irrottavan junakalustoon kertynyttä lunta ja jäätä. Laskennallisissa ja mittauksiin perustuvissa tutkimuksissa on pyritty selvittämään junakalustoon kohdistuvan herätteen ja lumen irtoamisen välistä yhteyttä. Junan värähtelykäyttäytymistä on tarkasteltu värähtelylaskelmilla, joiden avulla on saatu selville, millaisia kiihtyvyyksiä erilaiset herätteet aiheuttavat junaan. Lisäksi kiskon epäjatkuvuuskohtien ja lumen irtoamisen välistä yhteyttä on tutkittu mittauksien avulla, jotka jakautuvat kahteen eri osioon. Mittausten ensimmäisessä osiossa on seurattu kahta ongelmalliseksi todettua vaihdetta, vaihteesta yli menneitä junia ja junista vaihteisiin irronnutta lunta. Mittausten toisessa osiossa yhteen junakalustoon on kiinnitetty kamerat ja kiihtyvyysanturit, joiden avulla on seurattu kalustoon kohdistuvia herätteitä ja kaluston alustarakenteisiin kertynyttä lunta yhden junamatkan aikana. Samalla on ollut mahdollista selvittää myös herätteiden ja lumen irtoamisen välistä yhteyttä.

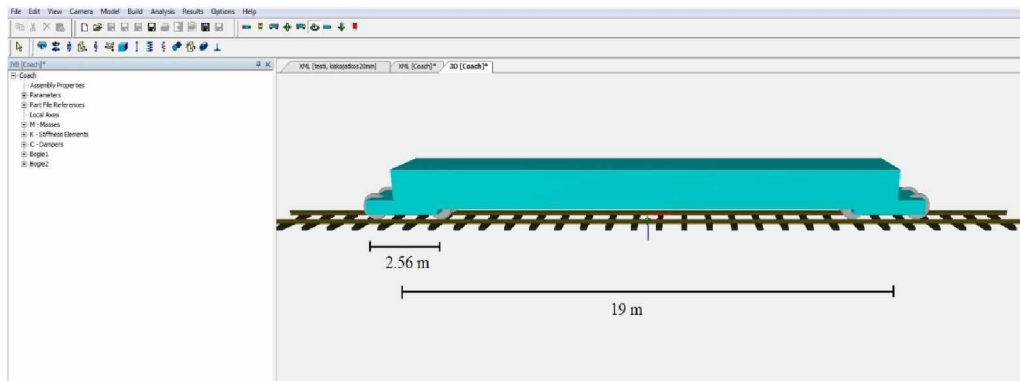
5.1 Värähtelylaskelmat

Työn yhtenä tarkoituksena oli selvittää, millaisia kiihtyvyyksiä erilaiset epäjatkuvuuskohtat aiheuttavat junakalustoon. Raiteen epäjatkuvuuskohtat aiheuttavat pyörään iskuvoiman, jonka suuruutta voidaan arvioida kaavoilla 4.25 ja 4.26. Näiden kaavojen avulla epäjatkuvuuskohtien vaikutusta voitaisiin arvioida käyttämällä vain junan värähtelymallia ja esimerkiksi kuvan 4.8 kaltaisia pyöriin kohdistuvia ajasta riippuvia iskuvoimia. Kaavat pätevät kuitenkin vain kiskossa olevan kulmamuutoksen suuntautuesssa alaspäin, kuten esimerkiksi kisko jatkoskohtien tapauksessa. Kisko jatkoskohdissa iskuvoiman suuruuden on arvioitu vastaavan noin $1,15^\circ$ kulmamuutosta (Schmid et al. 2010). Vaihteissa tapahtuvaa iskuvoimaa vastaavaa kulmamuutosta on vaikeampi arvioida. Toisaalta raiteen epäjatkuvuuskohta voi suuntautua myös raiteesta ylöspäin, jolloin iskuvoimien kaavat eivät välttämättä ole päteviä.

Epäjatkuvuuskohtien aiheuttamien vaikutusten laskennassa on siis hyvä ottaa mukaan myös radan värähtelymalli. Radan ja junavaunun värähtelymallien yhdistämisen myötä liikeytälöiden laskeminen vaikeutuu selvästi, joten tässä vaiheessa on siirrytty käyttämään valmista dynamiikkaohjelmaa. Dynamiikkaohjelmaan on mallinnettu haluttu junakalusto, kiskoprofiili ja kiskon epäjatkuvuuskohtat. Ohjelmalla ajettiin erilaisten epäjatkuvuuskohtien yli junan nopeutta vaihdellen, ja näin saatiin selville junakaluston värähtelykäyttäytyminen eri tilanteissa.

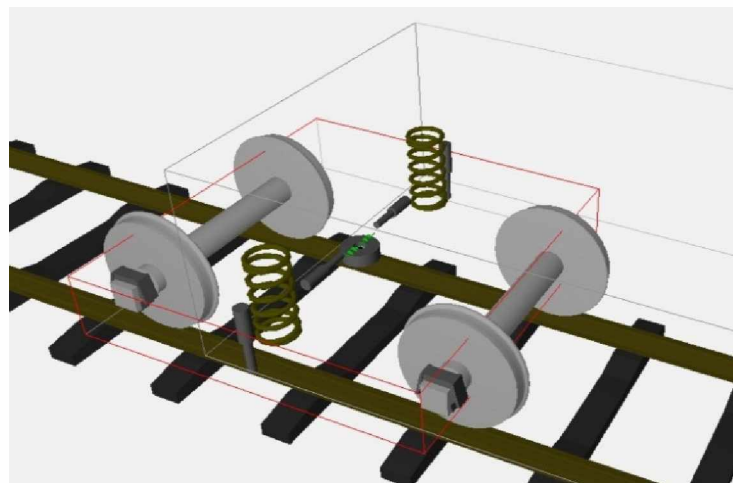
5.1.1 Junakaluston mallintaminen

Vampire-dynamiikkaohjelmalla mallinnettiin kuvan 4.4 värähtelymallia vastaava yksinkertaistettu versio tavallisesta matkustajavaunusta (kuva 5.1). Tämän dynamiikkaohjelman mallit koostuvat aina massoista ja pyöräkerroista, jotka on yhdistetty toisiinsa jousituksilla. Malliin tarvittavat massa- ja jousitustiedot on otettu yksikerroksisen IC-junan tiedoista taulukosta 4.1. Laskuissa käytettiin pyöräkerran massana jousittamatonta kokonaismassaa pyöräkertaa kohti.



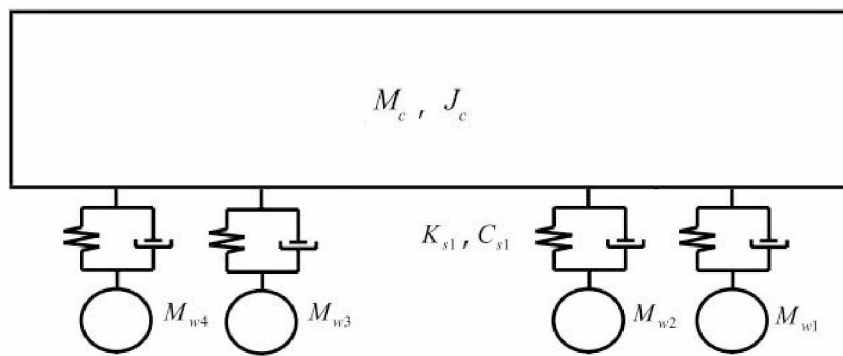
Kuva 5.1. Mallinnettu junakalusto.

Malli koostuu vaunurungosta, kahdesta telistä ja neljästä pyöräkerrasta. Lisäksi mallissa on kuvattu ensiö- ja toisiojousitukset. Ensiöjousituksen jäykkyyso- ja vaimennusominaisuudet on mallinnettu jokaiseen laakeripesään sijoitetulla holkkielementillä (*bush element*). Tällä tavoin telin ja pyörien väliset jouset ja vaimennukset saatiin yhdistettyä yhteen elementtiin. Toisiojousitus sisältää kierrejouset, jouston rajoittimet, pysty- ja sivuttaissuuntaiset vaimentimet, kallistuksenvakaimen sekä pitkittäissuuntaisen vetotangon (*traction path*). Kallistuksenvakain ja vetotanko on mallinnettu yhden holkkielementin avulla. Mallin ensiö- ja toisiojousitus on esitetty kuvassa 5.2.



Kuva 5.2. Mallissa käytetty jousitus.

Tavaravaunussa on kolmiosainen teli ja erilainen jousitusjärjestelmä, joten se mallinnetaan hieman eri tavalla. Tavaravaunulle on yksinkertaistuksen vuoksi käytetty kuvan 5.3 mukaista värähtelymallia, jossa kolmiosaisen telin osat on yhdistetty pyöräkertoihin ja vaunurunkoon. Mallissa telin keskiöpalkit on ajateltu osaksi vaunurunkoa, jolloin lastatun vaunun massana on käytetty 95000 kg. Jousittamattomassa massassa on huomioitu pyöräkertojen lisäksi myös telin sivupalkkien massat. Kolmiosaisen telin vaikutus on otettu huomioon muuttamalla pyöräkerran massaa siten, että mallin pystysuuntaiset hitausominaisuudet vastaisivat riittävällä tarkkuudella oikeaa tapausta (Hakulinen et al. 2012). Pyöräkerran massana on siis käytetty 1650 kg, joka kuvaa samalla mallin jousittamatonta massaa.



Kuva 5.3. Tavaravaunun yksinkertainen värähtelymalli.

Tavaravaunun mallinnuksessa pyöräkerran ja vaunurungon välisessä kiinnityksessä on käytetty lineaarisia jousia sekä kitkavaimenninelementtejä. Kitkavaimennin mahdollistaa vaunun vaimennusominaisuuksien muuttumisen kuormituksen mukaan. Mallinnuksessa tarvittavat massa-, jäykkyys- ja vaimennustiedot on lueteltu taulukossa 4.2.

Molempiin malleihin on lisäksi sijoitettu kiihtyvyyssanturit takimmaisena pyöräkerran kohdalle. Matkustajavaunussa antureita on pyöräkerrassa, telissä ja vaunurungossa. Tavaravaunussa anturit on sijoitettu pyöräkertaan ja vaunurunkoon. Anturit mittaavat kiihtyvyyttä radan suunnassa sekä vaaka- ja pystysuunnissa.

5.1.2 Ominaisvärähtelymuodot

Mallinnuksen jälkeen vaunun ominaisvärähtely kannattaa selvittää ominaisvärähtelyanalyysin avulla. Ominaisvärähtelyanalyysi kertoo vaunun ominaisvärähtelytaajuuudet ja niitä vastaavat ominaisvärähtelymuodot. Analyysin tekeminen on hyvä keino tarkistaa mallin toimivuus, sillä ominaisvärähtelyanalyysin suorittaminen todistaa, että mallin massa-, jäykkyys- ja vaimennusmatriisit ovat kunnossa. Ominaisvärähtelymuotojen animaatiosta pystyy myös helposti tarkistamaan, onko malli oikealla tavalla tuettu. Samalla selviää, ovatko mallin eri osat kiinnitetty toisiinsa järkevällä tavalla.

Ominaisvärähtelyanalyysi tehtiin matkustajavaunun esimerkkinä käytetylle Ex-vaunulle ja tavaravaunun esimerkkinä käytetylle Vak-vaunulle. Matkustajavaunun mallissa on 32 vapausastetta ja siten 32 ominaisvärähtelymuotoa ja -taajuutta. Tavaravaunun mallissa vapausasteita on 22. Vapausasteiden lukumäärä on siis molemmissa malleissa selvästi suurempi kuin aiemmin kuvassa 4.4 esitetyssä yksinkertaisessa laskentamallissa, jossa vapausasteita oli kymmenen. Kaikissa malleissa pitäisi kuitenkin olla tunnistettavissa kuvassa 4.3 esitetyt vaunurungon ominaisvärähtelymuodot.

Ominaisvärähtelyanalyysi kannattaa suorittaa hyvin pienellä nopeudella, jotta vaunun muu värähtely ei sotke ominaisvärähtelyitä. Tässä tapauksessa vaunun nopeutena on käytetty $v = 0,01$ m/s.

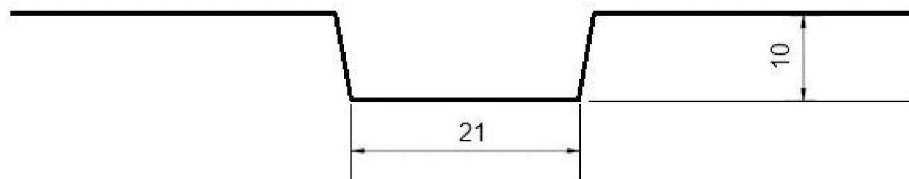
5.1.3 Kiskojaatkos

Dynamiikkaohjelmalla voidaan mallintaa erilaisia raiteen epäjatkuvuuskohtia, joista kiskojaatkoksen mallintaminen on yksinkertaisinta. Kiskojaatkoksen päiden väliin jää kiskojaatkokskohdissa jatkosrako. Kiskon jatkosrakojen maksimiavot on kerrottu taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1. Jatkosrakojen teoreettiset maksimiarvot (Ratahallintokeskus 2002).

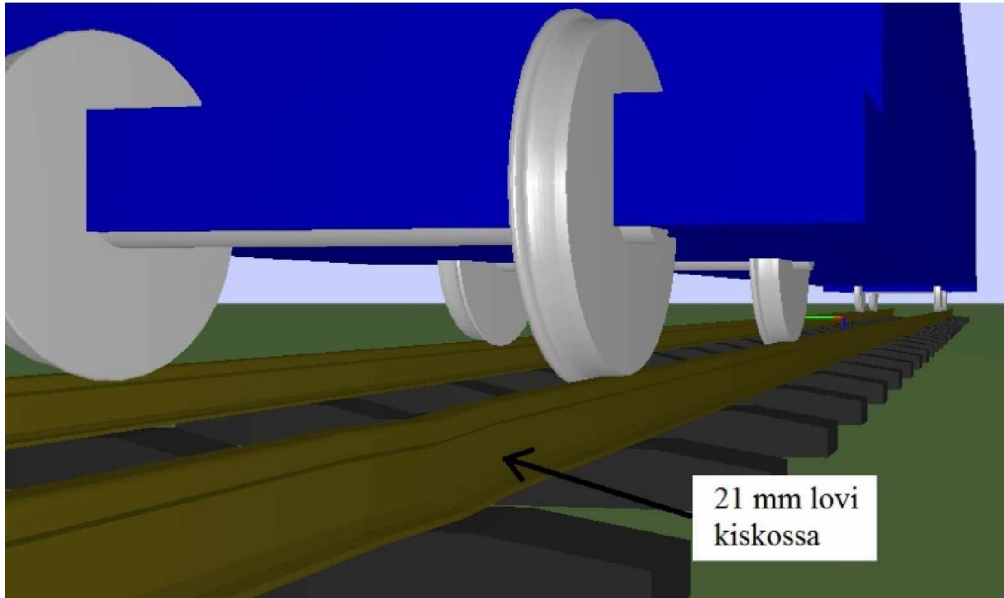
Kisko	Jatkosraon maksimiarvo [mm]	
	Nimellinen	Nimellinen + toleranssi
K30	18	23
K43	18	23
54 E1	21	26
60 E1	21	23
K60	18	24

Ohjelmassa epäjatkuvuuskohdat tulee ilmoittaa kiskon epätasaisuustiedoston (*rail irregularity file*) avulla. Tiedostoon on ilmoitettu tässä tapauksessa epäjatkuvuuskohdan sijainti ja kiskon pystysuuntainen poikkeama. Jatkosrakoa on mallinnettu 21 mm pituisella lovella molemmissa kiskoissa (kuva 5.4).



Kuva 5.4. Kiskojoatkoksen malli.

Loven syvyytenä on käytetty 10 mm. Loven syvyys on riittävä kiskojoatkoksen mallintamisessa, sillä halkaisijaltaan 920 mm oleva pyörä uppoaa 21 mm pitkään loveen vain 0,12 mm. Kuvassa 5.5 on esitetty ohjelman animaatiomallista otettu kuva mallinnetusta kiskojoatkoskohdasta.



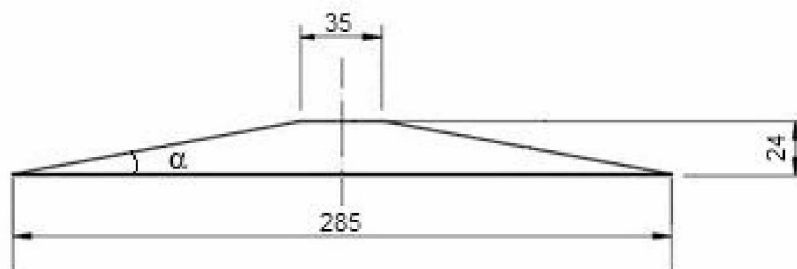
Kuva 5.5. Jatkosraon mallintaminen kiskossa.

Animaatiomallissa (kuva 5.5) kiskon jatkosrako näyttää painumalta kiskossa, sillä kiskon pystysuuntainen poikkeama koskee koko kiskoprofiilia. Kiskosta ei siis ole poistunut materiaalia loven kohdalta, vaan kiskoprofiili on vain siirtynyt loven kohdalla 10 mm alaspäin.

5.1.4 Kiskopomppu

Ohjelmalla on haluttu mallintaa myös kiskon pinnasta ylöspäin suuntautuva epäjatkuvuuskohta, jotta saadaan selville ylöspäin suuntautuvan kulmamuuoksen vaikutus junan värähtelykäyttäytymiseen. Epäjatkuvuuskohtan mallina on käytetty telien jousituksen vapauttamiseen käytettyä tšekkiläistä kiskopomppua, josta kerrotaan tarkemmin luvussa 5.4. Kiskopomppun ideana on testata raiteesta ylöspäin suuntautuvaa raiteen epäjatkuvuuskohtaa (kuva 5.6). Mallissa käytetyn pomppun korkeus kiskon yläpinnasta on 24 mm ja kulmamuuotos α on noin 11° . Kiskopomppu on kokonaisuudessaan 285 mm pitkä.

Epäjatkuvuuskohta on mallinnettu kiskon pystysuuntaisen poikkeaman avulla. Molemmat kiskot nousevat siis 24 mm korkeammalle ja tämän jälkeen 285 mm myöhemmin palaavat takaisin normaalille korkeudelle.



Kuva 5.6. Kiskopomppun malli.

Näiden kahden erityyppisen epäjatkuvuuskohdan tapauksessa on selvitetty, millaisia kiihtyvyyksiä ne aiheuttavat matkustaja- ja tavaravaunuihin eri nopeuksilla. Tämän perusteella selviää, kumman tyyppisellä epäjatkuvuuskohdalla on suurempi vaikutus junan värähtelykäyttäytymiseen. Epäjatkuvuuskohdat on sijoitettu mallinnuksessa molempiin kiskoihin samalle kohdalle, jotta mallinnustilanne vastaisi kolmanneksi mittaukseksi suunniteltua raiteen epäjatkuvuuskohdan vaikutusten tarkastelua (luku 5.4). Epäjatkuvuuskohdan sijoittaminen vain toiseen kiskoon aiheuttaisi junan värähtelykäyttäytymiseen merkittävän eron tähän tilanteeseen verrattuna.

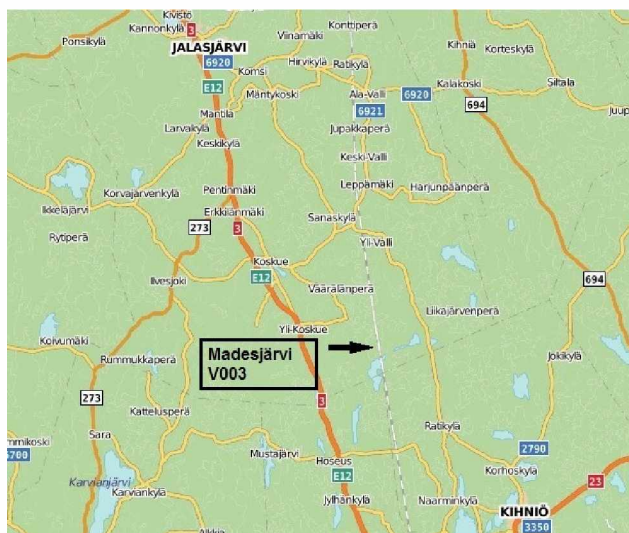
5.2 Lumen irtoamisen seuranta valikoiduissa vaihteissa

Vaihteiden aiheuttaman herätteen vaikutuksien seurantaa varten valittiin kaksi vaihdetta, joiden toiminnassa on havaittu usein häiriöitä. Häiriöitä voi aiheuttaa esimerkiksi yli kulkevasta junasta irronnut lumimassa, joka ajautuu vaihteen kielen ja tukikiskon väliin. Tällöin vaihde ei pääse liikkumaan halutulla tavalla. Vaihteita ja niihin irronnutta lunta seurattiin kameroiden avulla. Tarkoituksena oli selvittää, miten esimerkiksi junan nopeus ja vallitsevat sääolosuhteet vaikuttavat junasta irronneen lumen määrään.

5.2.1 Seurattavien vaihteiden valinta

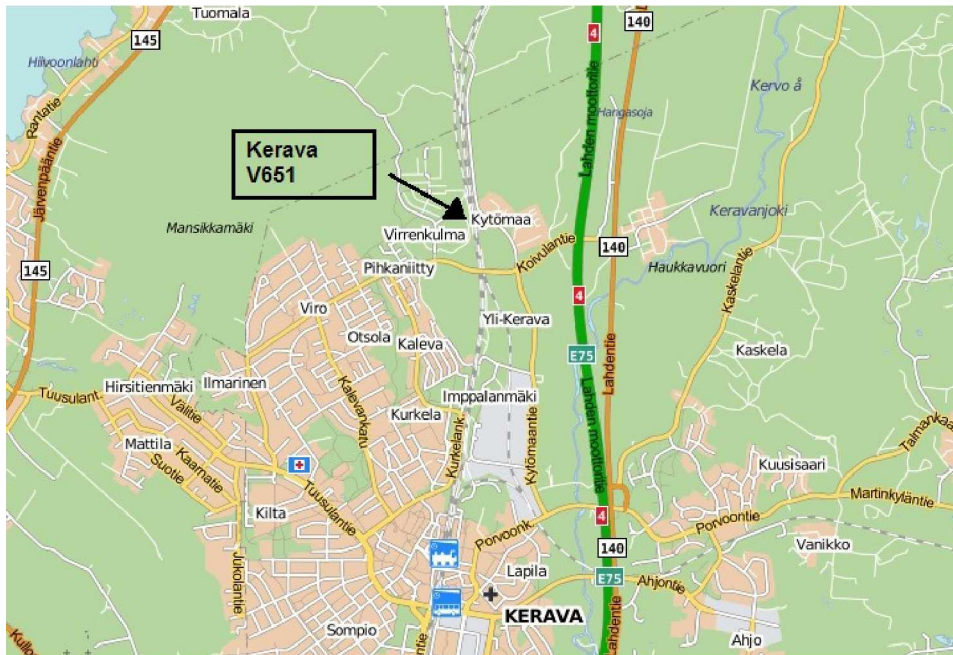
Kunnossapitäjät ovat havainneet, että osa vaihteista tarvitsee huoltoa useammin kuin toiset. Seurattavat vaihteet valittiinkin niiden vaihteiden joukosta, joissa oli havaittu keskimääräistä enemmän kunnossapito-ongelmia talviaikaan.

Ensimmäiseksi seurattavaksi vaihteeksi valittiin Madesjärvellä sijaitseva vaihde V003. Vaihde sijaitsee kuvan 5.7 mukaisesti Tampere–Seinäjoki-rataosuudella, noin 30 kilometriä Parkanosta pohjoiseen. Madesjärven vaihteesta kulkee yleensä noin 30 junaa päivässä, ja junia kulkee pohjoisen ja etelän suuntiin suunnilleen yhtä paljon. Vaihde on sekaliikennealueella, eli siitä kulkee sekä matkustaja- että tavaraliikennettä. Madesjärven vaihteessa on ollut ongelmia erityisesti lumisuojujen rikkoon- tumisen vuoksi. Lumisuojujen rikkoon- tumisen on nähty johtuvan vaihteen yli kulkevis- ta junista pudonneesta lumesta.



Kuva 5.7. Madesjärven vaihteen sijainti.

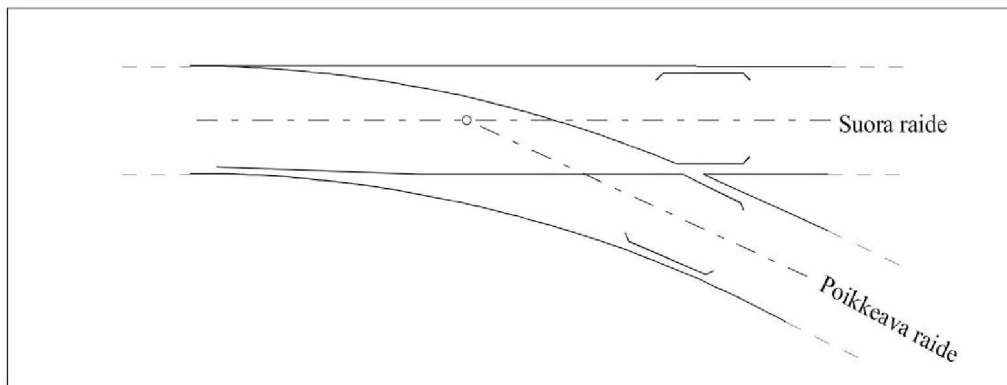
Toiseksi seurattavaksi vaihteeksi valittiin Keravan Kytömaan vaihde V651. Vaihde sijaitsee Kerava–Järvenpää-rataosuudella noin kolme kilometriä Keravan keskustasta pohjoiseen (kuva 5.8).



Kuva 5.8. Keravan vaihteen sijainti.

Keravan vaihteesta kulkee yleensä noin 50 junaa päivässä. Vaihteesta kulkee sekä lähiliikenne- että kaukoliikennejunia, mutta ei juurikaan tavarajunia.

Madesjärven ja Keravan vaihteet ovat niin sanottuja yksinkertaisia vaihteita. Yksinkertaisessa vaihteessa on kuvan 5.9 mukaisesti suora ja poikkeava raide. Näitä vaihteita merkitään lyhenteellä YV.



Kuva 5.9. Yksinkertaisen vaihteen suora ja poikkeava raide. (Ratahallintokeskus 2000)

Molemmat seurattavat vaihteet ovat tyyppiä YV60-900-1:18-V. Tämä merkintä tarkoittaa sitä, että poikkeavan raiteen kaarresäde on molemmissa vaihteissa 900 metriä ja poikkeava raide kaartuu vasemmalle. Kun poikkeavan raiteen kaarresäde on yli 300 metriä, vaihde luokitellaan pitkäksi vaihteeksi. Madesjärven ja Keravan vaihteet ovat siis molemmat pitkiä vaihteita. Lisäksi molempien vaihteiden risteyssuhde on 1:18.

Madesjärvellä juna on kulkenut toisesta vaihteesta juuri ennen kuvattavaan vaihteeseen saapumista. Etelän suuntaan kulkevilla junilla edellinen vaihte on ollut noin kilometri ennen kuvattavaa vaihdetta, pohjoisen suuntaan kulkevilla edellisellä vaihteella ja kuvattavalla vaihteella on eroa vain noin 100 metriä. Osa junan alustaan kertyneestä lumesta on siis voinut irrota jo edellisen vaihteen kohdalla. Kunnossapitäjän kokemusten mukaan kuitenkin juuri valitun vaihteen suhteen on ollut eniten ongelmia. Keravan vaihteessa V651 lähes kaikki junat kulkevat etelän suuntaan, jolloin edellisen vaihteen ja kuvattavan vaihteen välillä on noin neljä ratakilometriä.

Madesjärven ja Keravan vaihteen kohdalla rataosuuden nopeusrajoitus on 200 km/h. Suurin sallittu nopeus poikkeavalle raiteelle ajettaessa on kummassakin vaihteessa 80 km/h. Suoraan ajettaessa suurin sallittu nopeus tämän tyyppisessä vaihteessa on jopa yli 200 km/h, eli tässä tapauksessa suurin sallittu nopeus on suoraan ajettaessa nopeusrajoituksen mukainen 200 km/h. (Ratahallintokeskus 2000.)

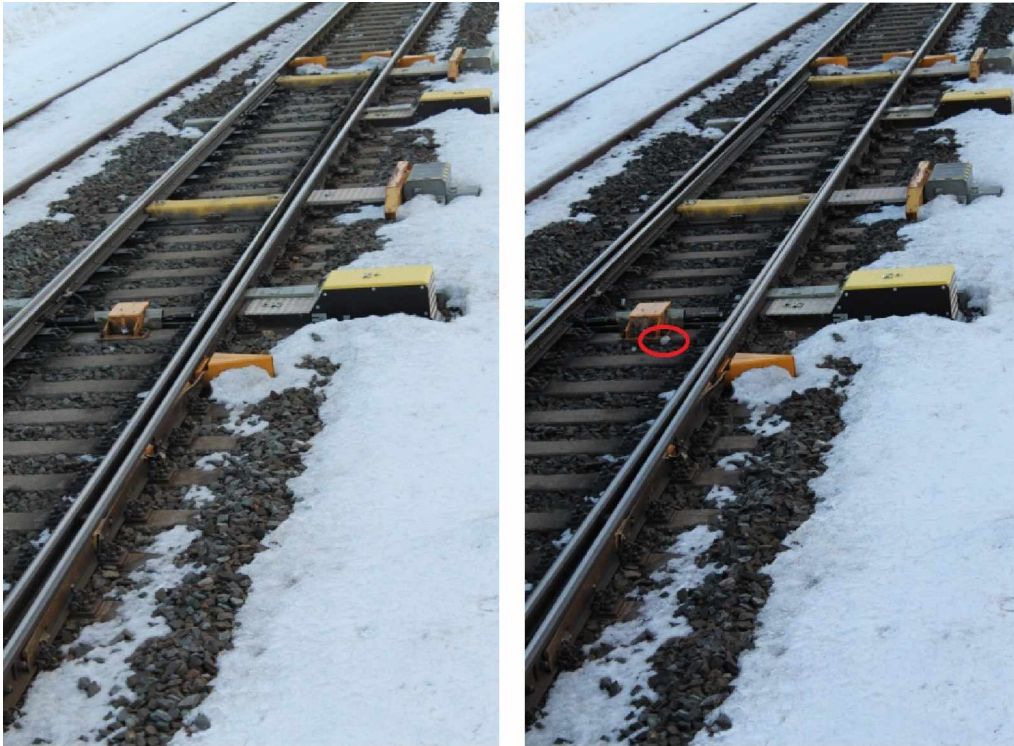
5.2.2 Seurantamenetelmä

Vaihteiden seuranta aloitettiin Madesjärvellä 9.2.2012 ja Keravalla 16.2.2012. Seuranta jatkettiin kevään ajan lumen sulamiseen asti. Vaihteeseen asennettiin kamerat, jotka ottivat kuvan junasta sen ylittäessä vaihteen. Kamerat ottivat kuvan vaihteesta myös minuutti ensimmäisen kuvan jälkeen. Näitä jokaisen junan jälkeen otettuja kuvia vertailtaessa selviää, onko kuvien välissä menneestä junasta pudonnut lunta vaihtealueelle.

Jokaisesta junasta kirjattiin ylös junan kulkuaika, suunta, nopeus, ulkoilman lämpötila, sääolosuhteet sekä junasta irronneen lumen määrä. Lisäksi junasta otetusta kuvasta oli tarkoitus selvittää junan tyyppi sekä arvioida junan ympärillä pölyävän lumen määrää.

Lumen irtoamista seurattiin vertailemalla edellisen junan jälkeen otettua kuvaa tarkasteltavan junan jälkeen otettuun kuvaan. Kuvien tarkastelussa on pyritty erottamaan tuulen tai junan aiheuttaman ilmapirran mukana siirtyneet lumimassat niistä, jotka ovat irronneet yli menneestä junasta. Tämä ei kuitenkaan ollut mahdollista etenäkään silloin, kun lumimassa siirtyi tuulen mukana kuvaan kuvan ulkopuolelta. Oletuksena on siis ollut, että kaikki kuvaan ilmestyneet lumimassat ovat pudonneet yli menneestä junasta.

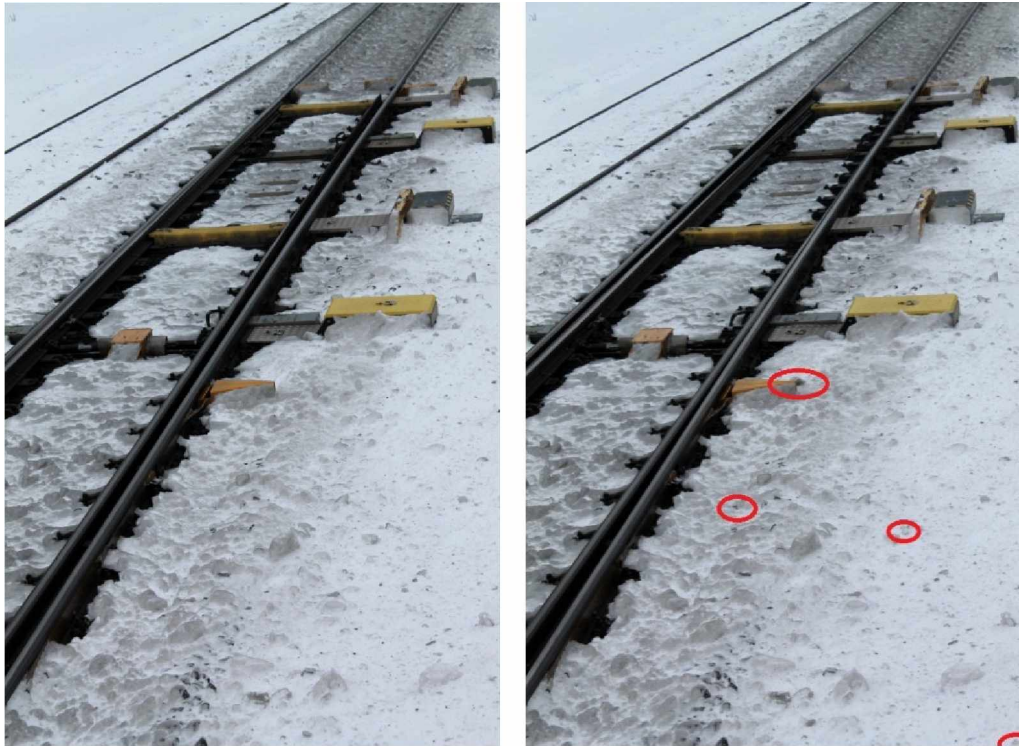
Junasta irronneen lumen määrää arvioitiin asteikolla 0–3. Mikäli lunta on pudonnut vain muutamia hyvin pieniä palasia tai yksi hiukan isompi, on määrää arvioitu luvulla 1. Jos pieniä irronneita lumipalasia on ollut enemmän tai isompia korkeintaan kaksi, on irronneen lumen määrää arvioitu luvulla 2. Luku 3 viittaa siihen, että isompia irronneita lumipalasia on ollut enemmän kuin kaksi tai pieniä lumipalasia on ollut huomattava määrä. Mikäli kuvissa ei ole tapahtunut muutosta tai lumipalasten siirtymien on arvioitu johtuvan vain tuulesta tai junan ilmapirrasta, on irronnutta lumimäärää arvioitu luvulla 0. Kuvissa 5.10–5.12 on esimerkkejä lumen määrän arvioinneista Madesjärvellä.



Kuva 5.10. Esimerkki lumen irtoamisesta tasolla 1. Madesjärvi, vaihde V003, 11.3.2012.



Kuva 5.11. Esimerkki lumen irtoamisesta tasolla 2. Madesjärvi, vaihde V003, 28.2.2012.



Kuva 5.12. Esimerkki lumen irtoamisesta tasolla 3. Madesjärvi, vaihde V003, 18.2.2012.

Kuvista pystytään luonnollisesti havaitsemaan vain kuvan alueella tapahtuneet muutokset irronneen lumen suhteen. Mikäli junasta on irronnut lunta heti vaihdealueen jälkeen, sitä ei voida havaita eikä siten myöskään huomioida tuloksissa.

5.2.3 Mittauslaitteet

Vaihteisiin sijoitettiin valokuvaukseen pohjautuva automaattinen kuvausjärjestely, joka kuvasi jokaisen vaihteen ylittävän junan sekä vaihteen junan ylityksen jälkeen. Kaksi kameraa sijoitettiin Madesjärvellä kuvan 5.13 mukaisesti. Kameroina käytettiin Canon EOS 1000D -merkkisiä digitaalisia järjestelmäkameroita, joiden ympärille rakennettiin sadesuoja. Kamerat yhdistettiin viereiseen tietokoneeseen, ja kuvat siirrettiin tietokoneen etähallintaohjelman tiedostonsiirto-toiminnan avulla Madesjärven tietokoneesta Tampereelle. Vastaava kuvausjärjestely tehtiin myös Keravan vaihteeseen.



Kuva 5.13. Madesjärven vaihteen kameroiden asennus.

Lisäksi kummassakin vaihteessa oli automaattinen mittausjärjestely junan nopeuden ja suunnan sekä ulkoilman lämpötilan selvittämiseksi. Junan nopeus ja suunta selvitettiin junan akselipainoa mittaavien voima-antureiden avulla.

5.3 Lumen kertymisen ja kiihtyvyyksien seuranta valikoidussa kalustossa

Lumen ja jään irtoamisen kannalta on olennaista, mihin kohtiin junan alustarakennetta lunta ja jäätä kertyy eniten. Tämän selvittämiseksi kehitettiin kuvausjärjestelmä, jolla voidaan seurata lumen ja jään kertymistä valikoidussa kalustossa. Tarkoituksena oli selvittää muun muassa sääolosuhteiden vaikutus lumen kertymiseen ja kertymisen kannalta kriittisimmät alueet junan alustarakenteessa. Samalla oli tarkoitus tarkkailla, minkälaisissa tilanteissa lumi irtoaa junasta, ja minkälaisia kiihtyvyyksiä junaan tällöin kohdistuu.

5.3.1 Kaluston valinta

Tarkoituksena oli toteuttaa seurantakuvaus ongelmalliseksi arvioidulle kalustoyksikölle. Esimerkiksi Pendolino-junilla on ollut paljon ongelmia talviliikenteessä, joten kameraseuranta olisi ollut hyvä toteuttaa tällaisessa ongelmallisessa kalustossa. Käytännön syistä seurattavaksi kalustoksi valittiin kuitenkin mittausvaunu A17, johon kameroiden ja antureiden asennus oli järjestettävissä (kuva 5.14).



Kuva 5.14. Mittausvaunu A17 ja vaunun alustaan asennetut kamerat.

Mittausvaunussa oli valmiina läpiviennit ja sähkönsyöttö, ja lisäksi kameroiden kiinnitys vaunun korkeaan alustaan onnistui helpommin kuin matalaan Pendolinoon. Mittausvaunu A17 vastaa rakenteeltaan pikajunavaunua, mutta sen massa- ja jousitusominaisuudet poikkeavat tavallisesta matkustajavaunusta.

5.3.2 Seurantamenetelmä

Mittausvaunun alle sijoitettiin videokamerat, joiden avulla pystyttiin seuraamaan lumen kertymistä junan alustaan matkan aikana (kuva 5.15). Lisäksi samaan vaunuun sijoitettiin kiihtyvyyssanturit, jotka kertoivat junan pyöräkertaan, teliin ja vaunuun kohdistuneet kiihtyvyydet matkan aikana. Näin mahdollistui junaan kohdistuvan kiihtyvyyden ja lumen irtoamisen välisen yhteyden tarkastelu.



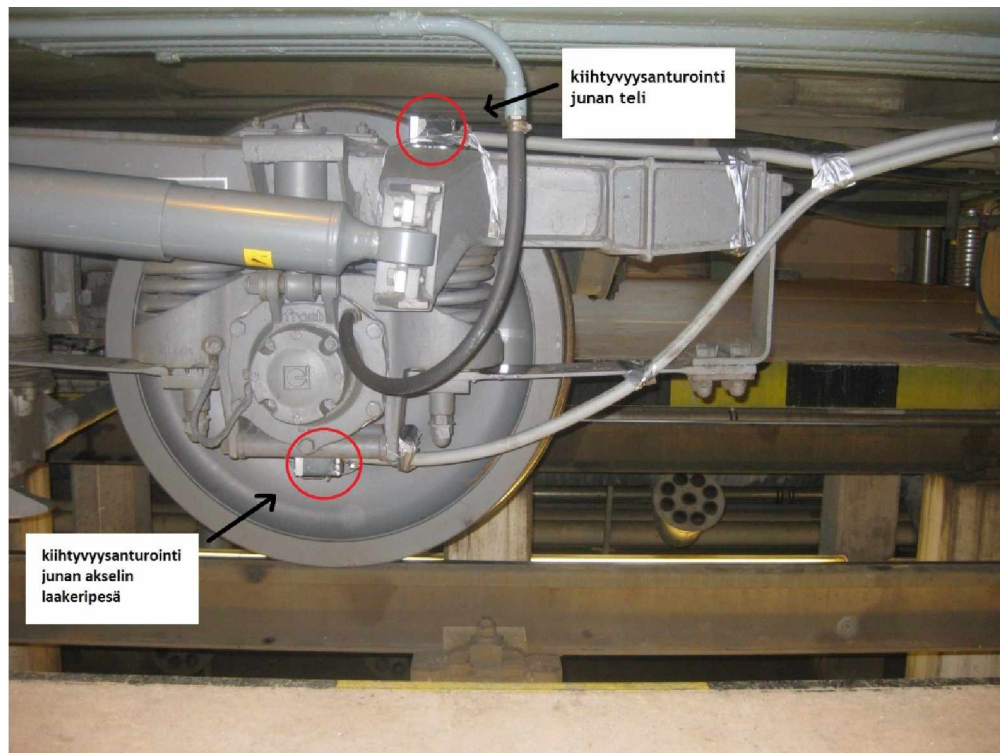
Kuva 5.15. Mittausvaunun alle sijoitetut videokamerat, suojakotelot ja valaistus.

Mittausvaunu sijoitettiin Intercity5-junan perään matkalle Helsinki-Joensuu-Helsinki. Mittaukset tehtiin torstaina 23.2.2012, jolloin IC5 lähti Helsingistä kello 12.52 ja saapui Joensuuhun kello 17.47. Juna lähti Joensuusta takaisin kello 18.18 ja saapui Helsinkiin kello 23.08. Mittauspäivänä lämpötila oli 0°C – 1°C , eli hieman nollan asteen yläpuolella. Helsingissä oli heikkoa lumisadetta ja Joensuussa puolipilvistä (Freemeteo 2012).

Kamerakuva ja kiihtyvyydestiedot yhdistettiin paikkaan GPS:n avulla. Lumen irrotessa pystyttiin siis selvittämään, missä lumen irtoaminen tapahtui ja minkälaiset kiihtyvyydet vaunuun tällöin vaikuttivat. Tällä menetelmällä oli mahdollista selvittää, irtoaako lumi junasta useimmiten juuri vaihteen kohdalla. Toisaalta kamerakuvan avulla oli myös mahdollista selvittää, mihin lunta alkaa kerääntyä ja vaikuttaako lumen kerääntymiseen selvästi esimerkiksi junan nopeus tai lumen pölyäminen.

5.3.3 Mittauslaitteet

Mittausvaunuun sijoitettiin kahdeksan pietsosähköistä kiihtyvyyssanturia takimmaisesta pyöräkerran kohdalle. Junavaunuun ja junan teliin sijoitettiin kiihtyvyyssanturit pystyyn, poikittain sekä radan pituussuuntaan. Junan takimmaisesta pyöräkerran akseliin sijoitettiin kiihtyvyyssanturit vain poikittain ja pystyyn, sillä radan suuntaan sijoitettua kiihtyvyyssanturia ei katsottu akselissa tarpeelliseksi. Antureiden sijoittelu on merkitty kuvaan 5.16.



Kuva 5.16. Kiihtyvyyssantureiden paikat junan telissä ja pyöräkerrassa.

Kuvassa 5.16 näkyvät sekä junan telin että junan pyöräkerran antureiden sijainnit. Junan pyöräkerran anturit kiinnitettiin junan akselin laakeripesään. Junavaunun kiihtyvyyssanturit sijoitettiin telin kohdalle junavaunun sisäpuolelle. Junaan sijoitettujen kiihtyvyyssantureiden mittausalueet olivat pyöräkerrassa ± 1000 g, telissä ± 100 g ja vaunussa ± 10 g.

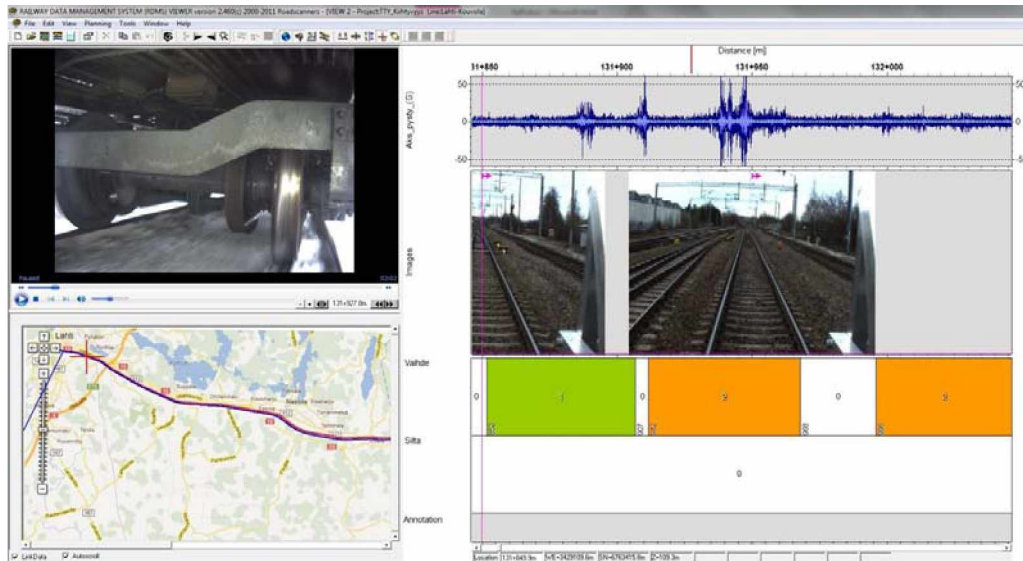
Anturit sijaitsivat menomatkalla vasemmalla puolella vaunun takimmaisessa pyöräkerrassa, joka ei toiminut ohjaavana pyöräkertana. Paluumatkalla anturoitu pyöräkerta sijaitsi etummaisena, jolloin kyseinen pyöräkerta toimi ohjaavana pyöräkertana.

Mittauksissa käytetyt videokamerat sijoitettiin kuvan 5.14 mukaisesti kuvaamaan junan alustaa. Kameran kuvasivat menomatkalla junan kulkusuunnasta taaksepäin ja paluumatkalla junan kulkusuuntaa kohti. Videokamerat sijoitettiin junan alustaan suojakoteloihin, jotta ne eivät vaurioituisi matkan aikana.

5.3.4 Kiihtyvyyksien tarkastelu

Työssä oli tarkoitus selvittää, minkälaisia kiihtyvyyksiä erilaiset epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat vaunurunkoon ja teliin. Huomiota kiinnitettiin erityisesti erilaisten vaihdetyyppien aiheuttamiin kiihtyvyyksiin. Näissä mittauksissa selvisi samalla, millaisia keskimääräisiä kiihtyvyyksiä liikkeellä olevaan junaan kohdistuu koko junamatkan aikana.

Kiihtyvyydata liitettiin kamerakuvaan ja GPS-tietoihin Roadscanners Oy:n Railway Data Management System (RDMS) -ohjelmalla, jolloin kiihtyvyydet pystyttiin yhdistämään erilaisiin raiteen epäjatkuvuuskohtiin (kuva 5.17). Tämän avulla saatiin selville erilaisten vaihteiden aiheuttamat keskimääräiset kiihtyvyydet mittaavaunussa. Kiihtyvyydettarkastelu tehtiin menomatkalta, jolloin ulkona oli vielä kohtuullisen valoisaa ja kamerakuva siten selkeämpi.



Kuva 5.17. Kiihtyvyyssarvot, kamerakuva ja GPS-tiedot yhdistettynä RDMS-ohjelmalla.

Kuvan 5.17 vasemmassa yläosassa on näkyvillä junan alapuolelle sijoitetun kameran tallentamaa kuvaa matkalta. Kuvan 5.17 vasemman alaosan kartasta nähdään junan kulkureitti ja sijaintitiedot. Kiihtyvyyssarvot junan vaunusta, telistä ja pyöräkerrasta ovat kuvan 5.17 oikeassa yläosassa. Lisäksi ohjelmaan on merkitty vaihteiden, siltojen ja tasoristeysten sijainnit.

Kiihtyvyyssietoja tarkasteltiin aluksi yleisesti menomatkalla koko Helsinki-Joensuu-osuudella, jolloin saatiin arvioitua kiihtyvyyksien suuruusluokkia suoralla rataosuudella ja vaihteissa. Samalla saatiin selville, kuinka usein junakalustoon kohdistuvat normaalivärähtelystä poikkeavat kiihtyvyydet ilmenevät juuri vaihteiden kohdalla. Tämän jälkeen keskityttiin tarkastelemaan kahden erityyppisen vaihteen aiheuttamia kiihtyvyyksiä junavaunussa, telissä ja pyöräkerrassa. Jokaisesta vaihteesta kirjattiin ylös kiihtyvyyssietojen lisäksi vaihteen numero ja sijainti, vaihdetyyppi, vaihteen asennusvuosi sekä junan nopeus. Lisäksi merkittiin kulkeeko juna myötä- vai vastavaihteeseen ja suoraan vai poikkeavalle radalle.

Tarkasteltaviksi vaihteiksi valikoituivat pitkistä vaihteista YV60-900-1:18 ja lyhyistä vaihteista YV60-300-1:9. Tarkasteltavia vaihteita haluttiin saada useita samaan tarkasteluluokkaan, ja nämä vaihdetyypit olivat yleisimpiä vaihteita tarkastelumatalla. Kummatkin tarkasteltavat vaihteet ovat kuvan 5.9 mukaisia yksinkertaisia vaihteita. Lisäksi ensimmäinen vaihdetyyppi vastaa lumen irtoamisen seurantaan valittuja Madesjärven ja Keravan vaihteiden vaihdetyyppejä.

Kerava-Lahti-rataosuudella suurin sallittu nopeus on 220 km/h, Lahti-Lappeenranta-osuudella 160 km/h ja Lappeenranta-Joensuu-osuudella 140 km/h. Mittausvaunu oli sijoitettu IC5-junan perään, joten vaunu kulki korkeintaan nopeudella 140 km/h. Kaikki rataosuudet kuljettiin siis suunnilleen samalla nopeudella. Siksi eri osuuksien kiihtyvyyssietoja voidaan verrata toisiinsa, ja tiedoista on mahdollista päätellä jotain myös eri rataosuuksien kunnosta.

5.4 Raiteen epäjatkuvuuskohdan vaikutusten tarkastelu

Kolmantena mittauksena suunniteltiin tehtäväksi raiteen epäjatkuvuuskohdan vaikutusten tarkastelu. Mittauksen lähtökohtana oli tarkastella kiskoon rakennetun epäjatkuvuuskohdan vaikutusta junakaluston värähtelyihin ja kalustoon kertyneen lumen irtoamiseen. Tarkasteltavaksi epäjatkuvuuskohdaksi valikoitui luvussa 3 mainittu kohoamamalli c (kuva 5.18).



Kuva 5.18. Kiskon epäjatkuvuuskohta.

Tarkoituksena oli selvittää, millainen epäjatkuvuuskohta vastaa herätevaikutukseltaan rautatievaihdetta ja irrottaako tämän tyyppinen epäjatkuvuuskohta tehokkaasti junan alustaan kertynyttä lunta. Mikäli epäjatkuvuuskohta toimii hyvin lumen irrottajana, tällaisia kiskopomppuja voitaisiin käyttää lumen hallittuun irrottamiseen vaihtealueen ulkopuolella.

Jotta lumen irtoamista olisi voitu tarkastella, olisi mittauspaikalla pitänyt olla käytävissä hyvin lumisia vaunuja. Mittausten mahdollistuttua tarpeeksi lumisia päiviä ei talven ja kevään aikana enää tullut, joten mittauksia ei lopulta päästy tekemään. Mittausjärjestelyt mahdollisesti tulevia mittauksia varten on kuitenkin mietitty jo valmiiksi.

5.4.1 Mittausjärjestelyt

Epäjatkuvuuskohtia suunniteltiin testattavaksi suljetulla raidealueella, jossa lumisia vaunuja olisi ajettu kiskoihin liitettyjen epäjatkuvuuskohtien yli. Epäjatkuvuuskohdat olisi asennettu molempiin kiskoihin samalle kohdalle ja herätevaikutukseltaan kasvavaan järjestykseen. Erikokoiset epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat kalustoon erilaisia iskuja, ja iskujen vaikutusta vaunun eri osiin oli tarkoitus seurata kiihtyvyyssantureilla. Vaunun alustaan olisi asennettu kuvausjärjestelmä, jonka avulla olisi saatu selville, mistä alustan osasta lunta irtoaa ja kuinka suuria lumimääriä herätteet irrottavat. Toisaalta irronnutta lunta oli tarkoitus tarkastella myös kuvaamalla rata-aluetta herätteiden kohdalta ennen ja jälkeen junan ylityksen ja vertailemalla kuvia toisiinsa.

Mittaustuloksista oli tarkoitus analysoida kalustoon syntyneitä värähtelyitä ja niiden yhteyttä lumen irtoamiseen. Kamerakuvan avulla olisi selvitetty, mistä junan alustarakenteen osasta lumi tarkalleen ottaen irtoaa. Tarkoituksena oli selvittää herätteen aiheuttaman kiihtyvyyden ja lumen irtoamisen välinen yhteys. Lumen ja jään irtoamiseen vaikuttavat merkittävästi ympäröivät olosuhteet, joten mittausten aikainen lämpötila, ilmankosteus ja sääolosuhteet olisi merkitty ylös. Myös vaunujen ajohistoria oli tarkoitus selvittää.

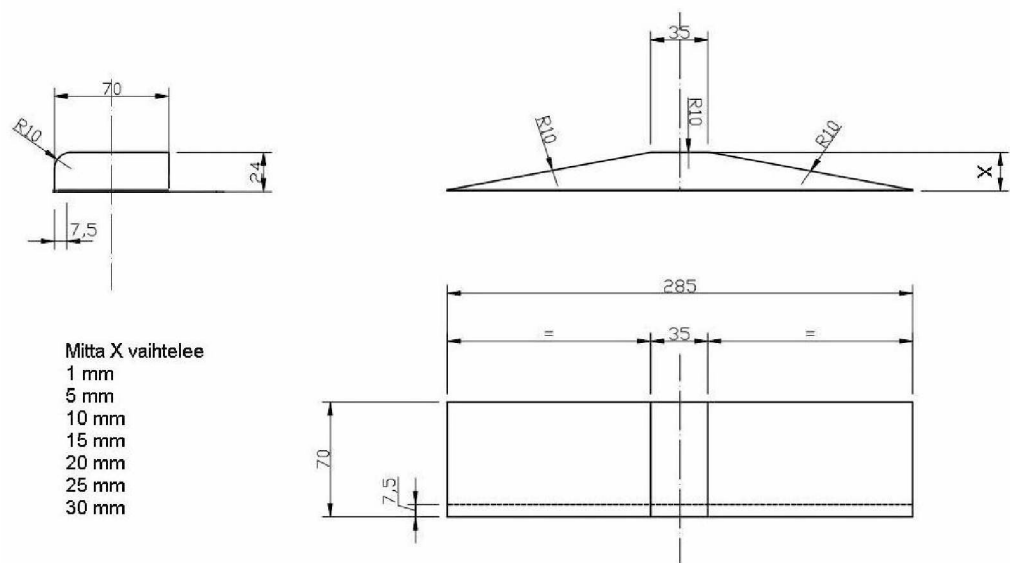
5.4.2 Herätteet

Herätteen geometrisena mallina suunniteltiin käytettäväksi telien jousituksen vapauttamiseen käytettyä tšekkiläistä kiskopomppua (kuva 5.19).



Kuva 5.19. Telien jousituksen vapauttamiseen käytetty kiskopomppu (Salmenperä & Nurmikolu 2012).

Kuvassa 5.19 esitetyn kiskopomppun korkeus kiskon yläpinnasta on 24 mm ja kulmamuu-
tuus on noin 11° . Kuvasta poiketen mittauksissa käytetyt pomput oli tarkoitus kiin-
nittää kiskon päälle, joten niitä ei olisi voitu kääntää välillä sivuun. Mittauksessa käy-
tettävien herätteiden korkeus ja siten myös kulmamuu-
tuus olisivat vaihdelleet, ja suu-
rimpien herätteiden suunniteltiin olevan hieman kuvan 5.19 kiskopomppua korkeam-
pia. Suunniteltujen herätteiden geometriaa on kuvattu tarkemmin kuvassa 5.20.



Kuva 5.20. Mittauksissa käytettävien kiskopomppujen geometria.

Herätteiden aiheuttama iskuvoima on verrannollinen sekä junan nopeuteen että herätteen kulmamuuutokseen, joten iskuvoimaa olisi saatu säädeltyä herätteiden kulmamuuutoksen lisäksi helposti myös junan nopeudella.

6 Tulokset

Tässä luvussa käydään läpi mittauksissa ja laskelmissa saatuja tuloksia. Tarkoituksena oli selvittää, miten erilaiset kiskon epäjatkuvuuskohdat vaikuttavat junan värähtelykäyttäytymiseen. Tavoitteena oli myös löytää yhteys junan värähtelyiden ja junaan kiinnittyneen lumen irtoamisen välille.

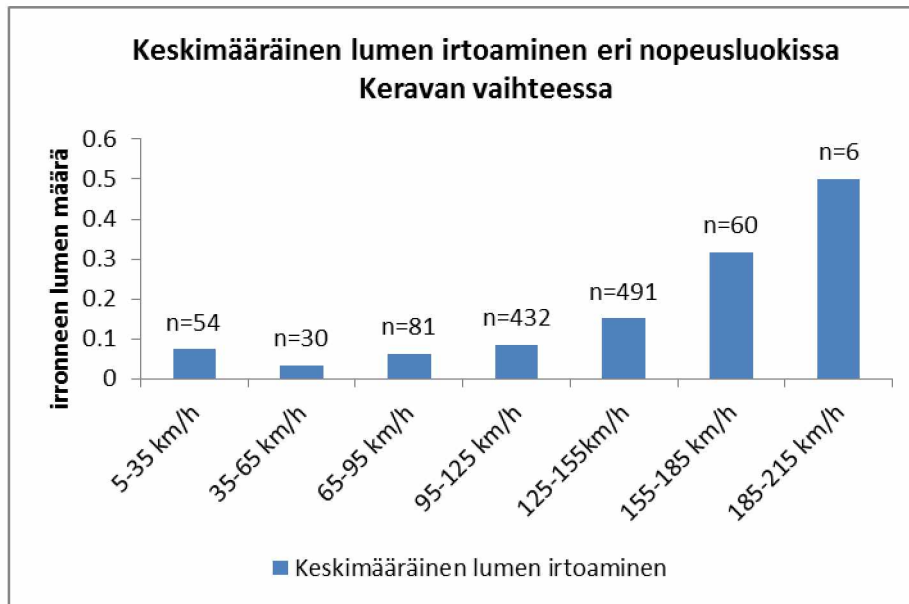
Mittaukset jakautuivat kahteen osaan, joista ensimmäisessä seurattiin lumen irtoamista junan alustasta vaihdealueella (luku 6.1). Mittauksissa selvitettiin sääolosuhteiden ja junan nopeuden vaikutusta junakalustoon kertyneen lumen irtoamiseen vaihdealueella. Toisessa osiossa tarkoituksena oli seurata junaan kertynyttä lunta sekä lumen irtoamista ja junaan kohdistuvia kiihtyvyyksiä kiskon epäjatkuvuuskohdissa (luku 6.2). Junan alustaan ei kuitenkaan kertynyt matkan aikana lunta juuri ollenkaan, joten toisessa osiossa päädyttiin seuraamaan lähinnä junaan kohdistuvia kiihtyvyyksiä. Kiihtyvyyksiä seurattiin sekä epäjatkuvuuskohdissa että tasaisilla suorilla rataosuuksilla. Laskentaosuudessa on tarkasteltu kiskoatkoksen ja kiskopompun vaikutusta junan värähtelytasoon.

6.1 Seuranta vaihteissa

Tutkimuksessa seurattiin junaan kiinnittyneen lumen irtoamista kahdessa vaihteessa. Jokaisesta vaihteen ylittäneestä junasta kirjattiin ylös junan kulkuaika, suunta, nopeus, ulkoilman lämpötila, sääolosuhteet sekä junasta irronneen lumen määrä. Tarkoituksena oli selvittää, miten esimerkiksi junan nopeus ja sääolosuhteet vaikuttavat irronneen lumen määrään. Irtonneen lumen määrää arvioitiin asteikolla 0–3 (luku 5.2).

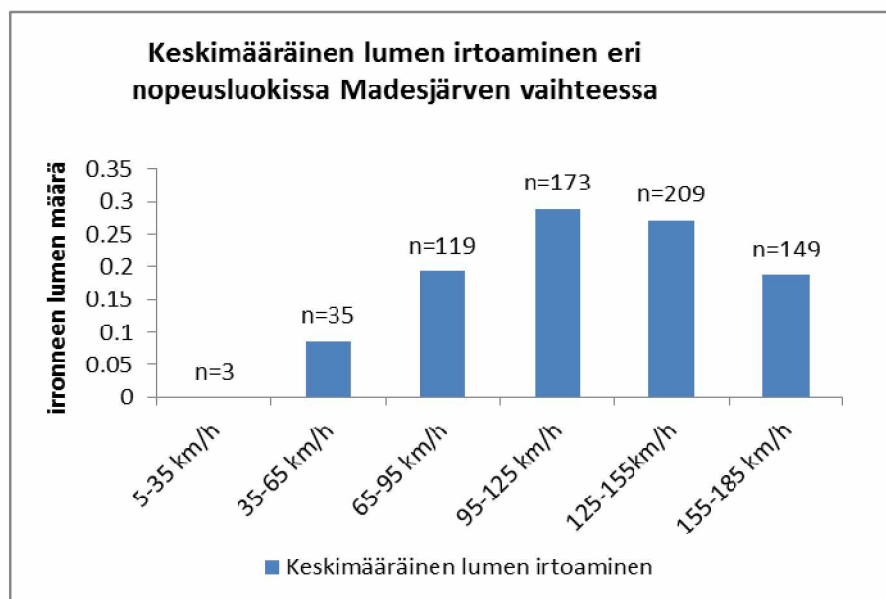
6.1.1 Junan nopeuden vaikutus lumen irtoamiseen

Ensimmäiseksi tarkasteltiin nopeuden vaikutusta lumen irtoamiseen. Junat on jaoteltu ajonopeutensa perusteella seitsemään nopeusluokkaan. Kuvassa 6.1 on esitetty keskimääräinen lumen irtoaminen yhtä junaa kohti eri nopeusluokissa Keravan vaihteessa. Kuvasta 6.1 huomataan, että suuremmilla nopeuksilla lunta on irronnut selvästi enemmän. Keravan vaihteessa voidaan havaita selvä yhteys lumen irtoamisen ja junan nopeuden välillä, ja junan nopeuden kasvaessa lunta irtoaa junista enemmän.



Kuva 6.1. Junaan kiinnittyneen lumen irtoaminen eri nopeusluokissa Keravan vaihteessa.

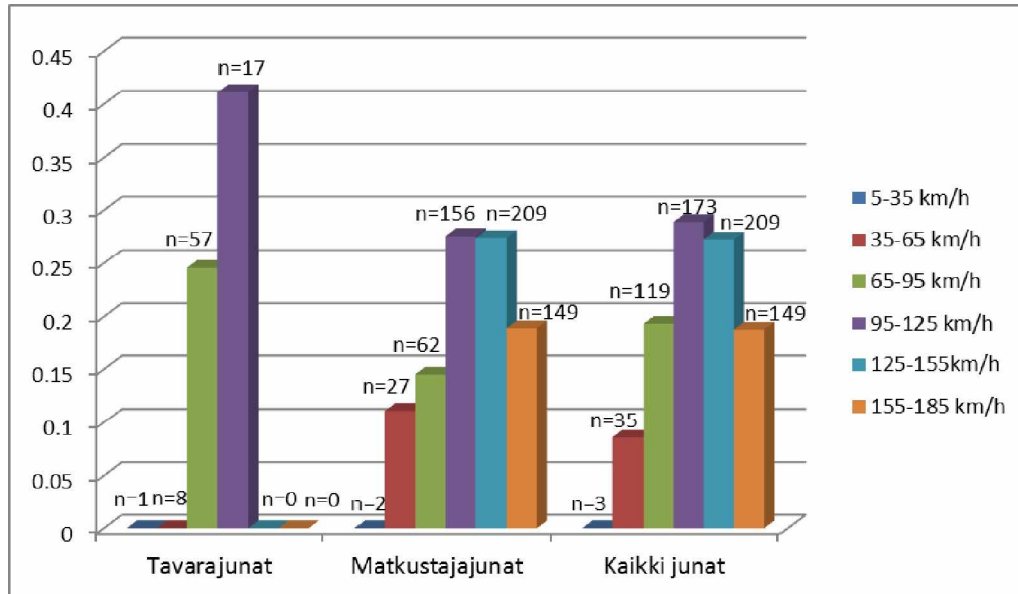
Tarkastellaan vielä vastaavaa kuvaajaa Madesjärven vaihteen osalta (kuva 6.2). Kuvaajassa ei ole mukana nopeusluokkaa 185–215 km/h, sillä kyseiseen nopeusluokkaan kuuluvia junia ei kulkenut Madesjärven vaihteesta lainkaan.



Kuva 6.2. Junaan kiinnittyneen lumen irtoaminen eri nopeusluokissa Madesjärven vaihteessa.

Madesjärven vaihteessa yhteys junan nopeuden ja lumen irtoamisen välillä ei ole yhtä selvä kuin Keravan vaihteessa. Alimmissa nopeusluokissa lunta irtoaa selvästi enemmän junan nopeuden kasvaessa, mutta ylimmissä nopeusluokissa ei tällaista yhteyttä enää ole. Erityisesti linjasta poikkeaa nopeusluokan 155–185 km/h junista irronneen lumen keskimääräinen määrä, joka on selvästi pienempi kuin kahdessa alemmassa nopeusluokassa.

Keravan vaihteesta kulki vain muutama tavarajuna, joten lumen irtoamista eri nopeusluokissa ei voida tarkastella Keravan vaihteessa erikseen matkustaja- ja tavarajunille. Madesjärven vaihteessa sen sijaan kulki jo selvästi enemmän tavarajunia, joten tarkastelu tehtiin vielä erikseen Madesjärven vaihteesta kulkeneille tavara- ja matkustajajunille (kuva 6.3).



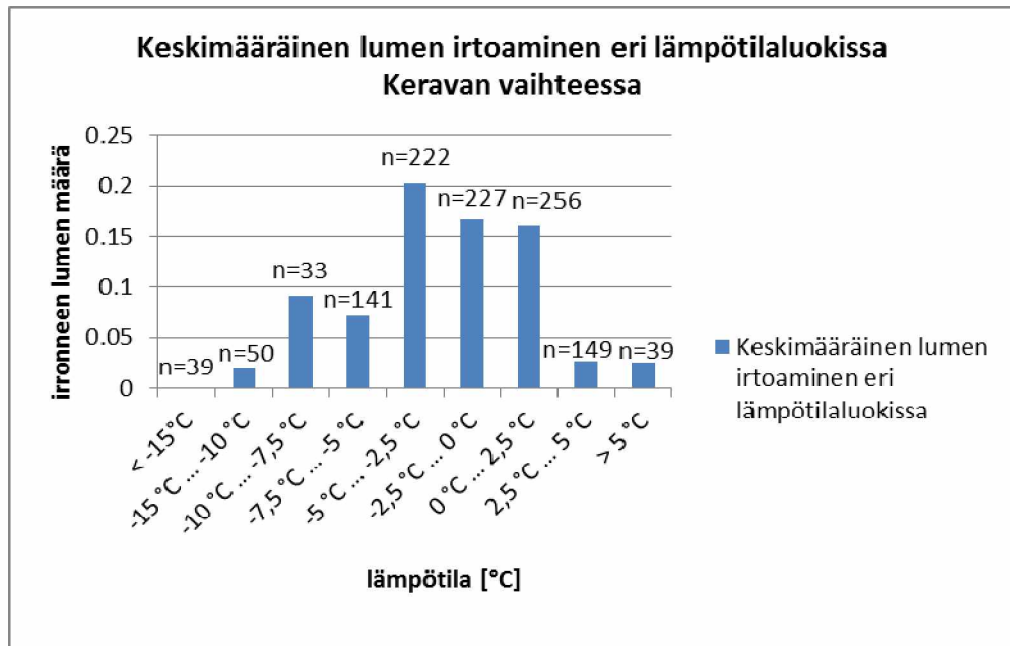
Kuva 6.3. Junaan kiinnittyneen lumen irtoaminen tavarajunille ja matkustajajunille eri nopeusluokissa Madesjärvellä.

Kuvasta 6.3 nähdään, että tavarajunilla lumen irtoaminen riippuu selvästi junan nopeudesta. Matkustajajunilla sen sijaan yhteys ei ole niin selkeä. Matkustajajunilla ylimpään nopeusluokkaan kuuluvista junista on irronnut selvästi vähemmän lunta kuin kahdessa alemmassa nopeusluokassa. Ylintä nopeusluokkaa lukuun ottamatta yhteys junan nopeuden ja irronneen lumen määrän suhteen on melko selkeä myös matkustajajunilla. Ylimmän nopeusluokan poikkeavaan tulokseen saattaa vaikuttaa esimerkiksi junan tyyppi. Tässä tarkastelussa on eroteltu ainoastaan tavarajunat matkustajajunista, joten eroa eri matkustajajunatyyppejen välillä ei pystytä arvioimaan.

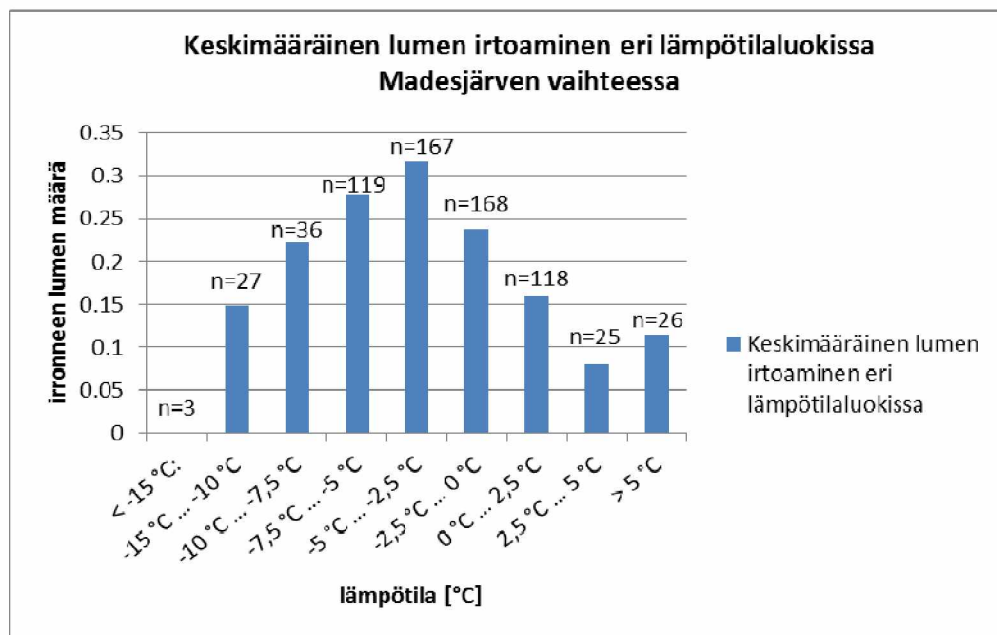
Vastaava tarkastelu tehtiin molempien vaihteiden tapauksessa vielä erikseen pelkästään sellaisille päiville, jolloin lunta on irronnut yli kulkevista junista selvästi keskimääräistä enemmän. Tässäkin tarkastelussa vain Keravan vaihteessa löytyi selvä yhteys junan nopeuden ja lumen irtoamisen välillä. Kuvaajat vastasivat melko tarkkaan aiemmin esitettyjä kuvia 6.1 ja 6.2.

6.1.2 Lämpötilan vaikutus lumen irtoamiseen

Seuraavaksi tarkasteltiin lämpötilan vaikutusta lumen irtoamiseen. Kuvissa 6.4 ja 6.5 on esitetty keskimääräinen lumen irtoaminen yhtä junaa kohti eri lämpötilaluokissa Keravan ja Madesjärven vaihteissa.



Kuva 6.4. Lumen irtoaminen eri lämpötilaluokissa Keravan vaihteessa.



Kuva 6.5. Lumen irtoaminen eri lämpötilaluokissa Madesjärven vaihteessa.

Kuvasta 6.4 nähdään, että Keravan vaihteessa junaan kertynyttä lunta on irronnut selvästi eniten lämpötilan ollessa välillä $-5^{\circ}\text{C} \dots +2,5^{\circ}\text{C}$. Lunta irtoaa siis eniten lämpötilan ollessa nollan asteen tuntumassa tai hieman sen alapuolella. Kuvan 6.5 mukaan junaan kertynyttä lunta on irronnut Madesjärvellä eniten lämpötilan ollessa välillä $-7,5^{\circ}\text{C} \dots 0^{\circ}\text{C}$. Lunta on irronnut siis molemmissa tapauksissa eniten lämpötilan ollessa hieman nollan asteen alapuolella. Lumen kiinnittymisvoimat riippuvat hyvin paljon lämpötilasta, ja nollan asteen tuntumassa kiinnittymisvoimat ovat selvästi heikommät kuin kovalla pakkasella. Toisaalta lumen heikko kiinnittyminen voi tarkoittaa myös sitä, että junaan kertynyt lumi on irronnut junasta jo ennen tarkasteltavaa vaihdealuetta.

Vastaava tarkastelu tehtiin jälleen erikseen pelkästään sellaisille päiville, jolloin lunta on irronnut yli kulkevista junista selvästi keskimääräistä enemmän. Tällöin Keravalla lunta on irronnut eniten lämpötilan ollessa nollan asteen tuntumassa ja Madesjärvellä lämpötilan ollessa hieman nollan asteen alapuolella. Tulokset vastasivat suunnilleen kuvissa 6.4 ja 6.5 esitettyjä tuloksia.

6.1.3 Muut lumen irtoamiseen vaikuttavat asiat

Keravalla suurin osa junista kulki samaan suuntaan, mutta Madesjärvellä junia kulki myötä- ja vastavaihteeseen suunnilleen yhtä paljon. Madesjärvellä tarkasteltiin eroja lumen irtoamisessa myötä- ja vastavaihteeseen kulkemisen välillä, ja junan kulkusuunnalla ei havaittu olevan merkitystä irronneen lumen määrään. Tuloksista ei myöskään noussut esille mitään tiettyyn aikaan kulkevaa yksittäistä junaa, josta lunta irtoaisi enemmän kuin muista junista. Kuvien perusteella pystyttiin erottamaan matkustaja- ja tavarajunat toisistaan, ja molemmista junatyypeistä irtosi lunta mittausten aikana keskimäärin suunnilleen saman verran. Matkustaja- ja tavarajunien keskinopeudet erosivat kuitenkin toisistaan selvästi, joten vastaava tarkastelu tehtiin vielä samassa nopeusluokassa oleville matkustaja- ja tavarajunille. Nopeusluokka valittiin siten, että molempien junatyyppien keskinopeus kyseisessä nopeusluokassa oli suunnilleen sama. Kun tarkasteltiin matkustaja- ja tavarajunia erikseen nopeusluokassa 65–95 km/h, jolloin molempien junatyyppien keskinopeus oli 77–79 km/h, tavarajunista irtosi enemmän lunta kuin matkustajajunista (kuva 6.3). Tavarajunia kulki kuitenkin valituista vaihteista kaiken kaikkiaan selvästi vähemmän kuin matkustajajunia. Mittaushavaintojen mukaan kaikista Madesjärven vaihteesta kulkeneista junista noin 11 % oli tavarajunia ja Keravan vaihteesta kulkeneista junista vain noin 0,3 %. Tämän vuoksi yksittäistapaukset vaikuttavat merkittävästi tavarajunista saatuihin tuloksiin. Junatyyppin vaikutusta lumen irtoamiseen olisi syytä tutkia tarkemmin siten, että mukana olisi enemmän tavarajunia. Myös erityyppisten matkustajajunien eroja lumen irtoamisen suhteen voitaisiin tutkia tarkemmin. Tässä tutkimuksessa saadusta kuvamateriaalista on pystytty erottamaan vain tavarajunat matkustajajunista.

Tuloksiin vaikutti siis selkeimmin ulkoilman lämpötila. Kun lämpötila oli nollan asteen tuntumassa tai hieman sen alapuolella, lunta irtosi vaihteen yli kulkevasta junasta selvästi useammin kuin muulloin. Luvussa 2 käsiteltiin lumen tai jään ja teräksen välillä vaikuttavia adheesiovoimia. Jo silloin todettiin, että lumen irtoaminen on hyvin lämpötilariippuvaista. Kovalla pakkasella adheesiovoimat ovat suuret ja lumen irtoaminen teräksen ja lumen liitoskohdasta epätodennäköistä. Lämpötila vaikuttaa myös lumen koheesiovoimiin, ja siksi lumen lujuusominaisuudet vahvistuvat lämpötilan laskiessa. Tämän vuoksi myös lumen irtoaminen murtumalla on kovalla pakkasella epätodennäköisempää. Mittauksista saadut tulokset tukevat tätä teoriaa.

Lisäksi lumen irtoamisella oli yhteys junan nopeuteen. Tämä voi johtua siitä, että junan nopeuden kasvaessa lumi irtoaa herkemmin. Toisaalta syynä voi olla myös se, että nopeammin kulkevat junat edustavat sellaista junatyyppiä, johon lunta kertyy enemmän ja siten irtoaa enemmän tai josta lunta irtoaa herkemmin. Myöhemmin tässä luvussa käy ilmi, että vaihteen epäjatkuvuuskohdan aiheuttama heräte on sitä suurempi, mitä nopeampaa vaihteesta kuljetaan. Tämän perusteella lumi irtoaisi mistä tahansa junatyyppistä herkemmin nopeuden kasvaessa.

Yleisesti ottaen lunta kuitenkin irtosi kuvatuille vaihdealueille melko harvoin ja vain vähäisiä määriä. Siksi pienetkin yksittäiset erot irronneen lumen määrässä vaikuttavat tuloksiin merkittävästi.

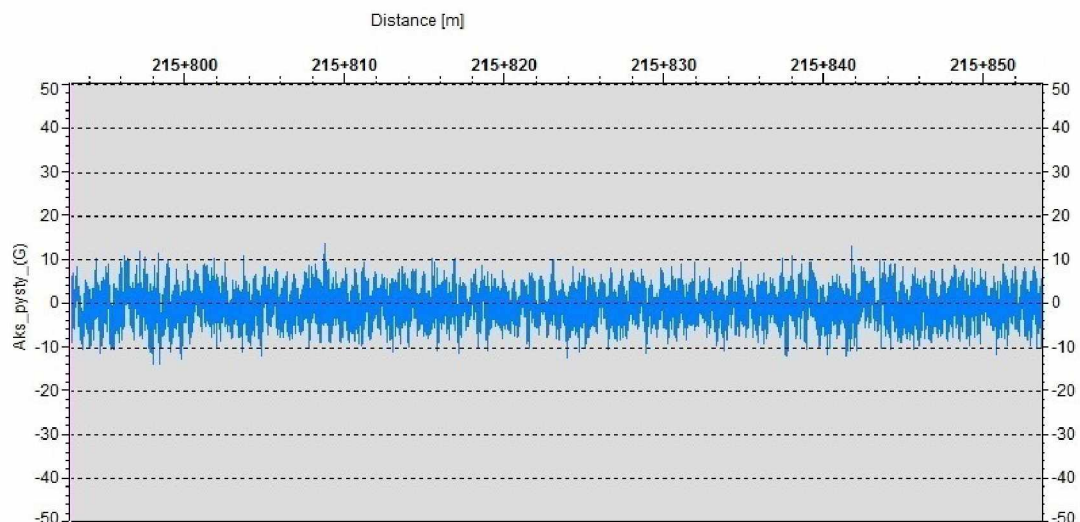
6.2 Seuranta kalustossa

Junakaluston värähtelykäyttäytymistä tarkasteltiin sekä suoralla rataosuudella että erilaisissa epäjatkuvuuskohdissa, erityisesti vaihteissa. Kaikki kiihtyvyydet on ilmoitettu yksikössä g, joka vastaa SI-järjestelmän kiihtyvyyden arvoa $g=9,81 \text{ m/s}^2$. Mittausten aikana oli tarkoitus seurata myös junakalustoon kertyneen lumen irtoamista junan alustasta, jolloin olisi saatu selville yhteys lumen irtoamisen ja junakalustoon vaikuttavien kiihtyvyyksien välille. Junan alustaan ei kuitenkaan mittauspäivänä kertynyt lunta juuri ollenkaan, joten lumen irtoamisen ja junakalustoon vaikuttavien kiihtyvyyksien välistä yhteyttä ei tässä mittauksessa saatu selville.

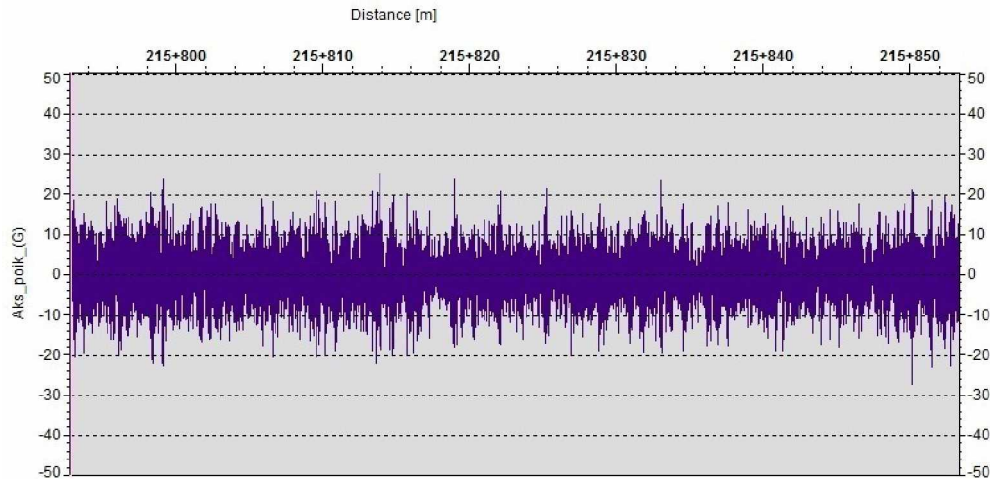
6.2.1 Kiihtyvyydet suorilla linjaosuuksilla

Kaluston kiihtyvyyksiä tarkasteltiin aluksi yleisesti matkalla Helsinki–Joensuu. Tarkastelun aikana on pyritty löytämään pyöräkerran, telin ja vaunun keskimääräinen värähtelykäyttäytyminen suoralla ja tasaisella rataosuudella ajettaessa (kuvat 6.6–6.13). Kuvissa on mukana kohinaa, jonka suuruus on arvioitu tarkastelemalla kiihtyvyydataa junan ollessa paikallaan. Kohinan on katsottu olevan niin pientä, että sillä ei ole vaikutusta kuvissa näkyvään kiihtyvyytasoon. Pyöräkerran akselistä, telistä ja vaunusta on tarkasteltu pysty- ja vaakakiihtyvyyksiä. Näiden lisäksi telistä ja vaunusta on tarkasteltu myös radansuuntaista kiihtyvyyttä. Suoran linjaosuuden kiihtyvyyksiä on tarkasteltu sellaisilla osuuksilla, joilla junan nopeus on ollut noin 140 km/h. Kiihtyvyyden arvot on mitattu mittausvaunulle A17, jonka massa- ja jousitusominaisuudet poikkeavat hieman tyypillisestä matkustaja- ja tavaravaunusta. Tämän vuoksi mitatut arvot pätevät sellaisenaan vain mittausvaunulle, mutta niiden avulla saadaan kuitenkin yleinen käsitys junien värähtelykäyttäytymisestä.

Kuvissa 6.6 ja 6.7 on tyypillisiä esimerkkejä pyöräkerran pysty- ja vaakakiihtyvyyksistä suoralla rataosuudella junan nopeuden ollessa 140 km/h. Pyöräkerran pystykiihtyvyyden värähtelytaso on noin 10 g ja vaakakiihtyvyyden noin 20 g. Värähtelytasolla tarkoitetaan tässä tarkastelussa sellaista värähtelyamplitudin arvoa, jonka alapuolelle suurin osa kiihtyvyyksisarvoista sijoittuu.

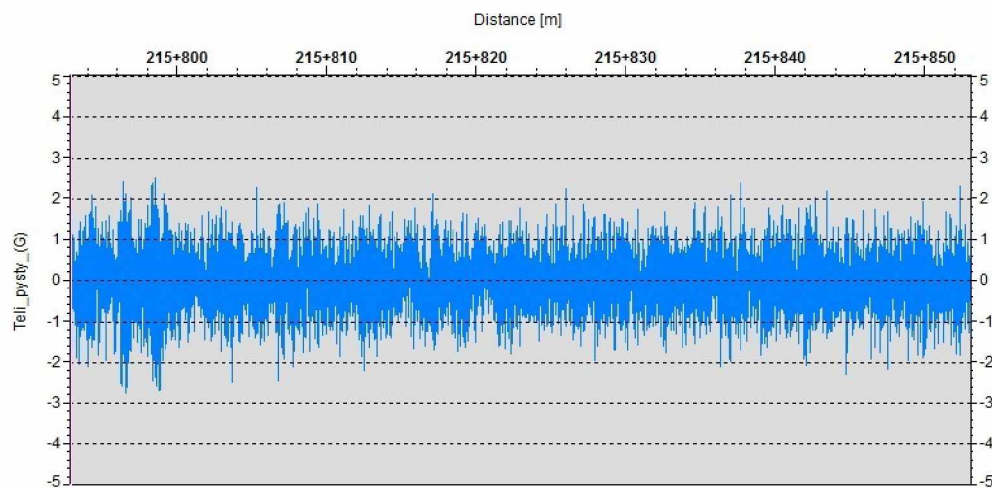


Kuva 6.6. Esimerkki pyöräkerran tyypillisestä pystykiihtyvyyksikuvaajasta.

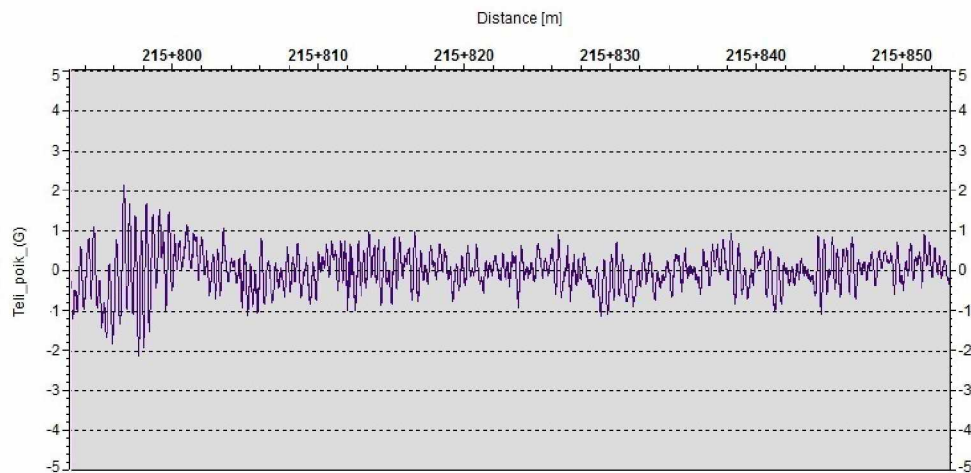


Kuva 6.7. Esimerkki pyöräkerran tyypillisestä vaakakiihtyvyytkuvaajasta.

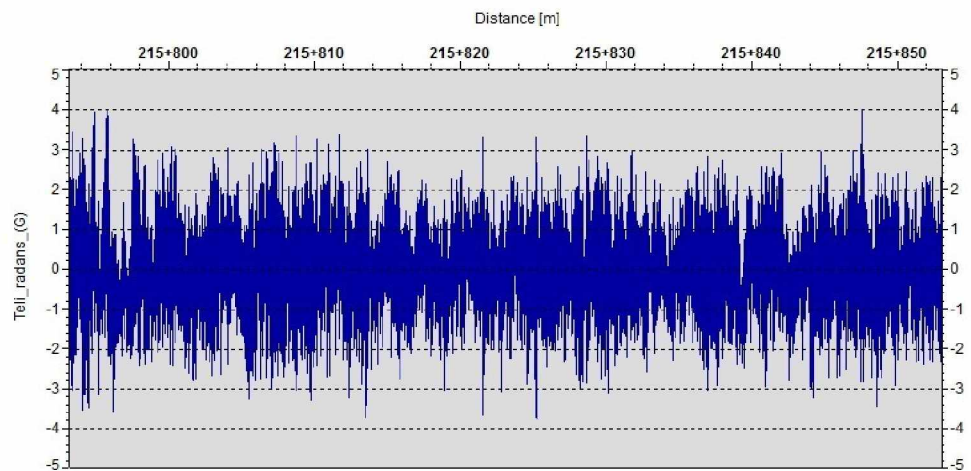
Kuvissa 6.8–6.10 on esimerkkejä telin tyypillisestä värähtelykäyttäytymisestä suoralla rataosuudella junan nopeuden ollessa 140 km/h. Telin pystykiihtyvyyden värähtelytaso on noin 2–3 g ja vaakakiihtyvyyden noin 1–2 g. Telistä mitattiin myös radansuuntaista kiihtyvyyttä, jonka värähtelytaso esimerkkitapauksessa on noin 3 g.



Kuva 6.8. Esimerkki telin tyypillisestä pystykiihtyvyytkuvaajasta.

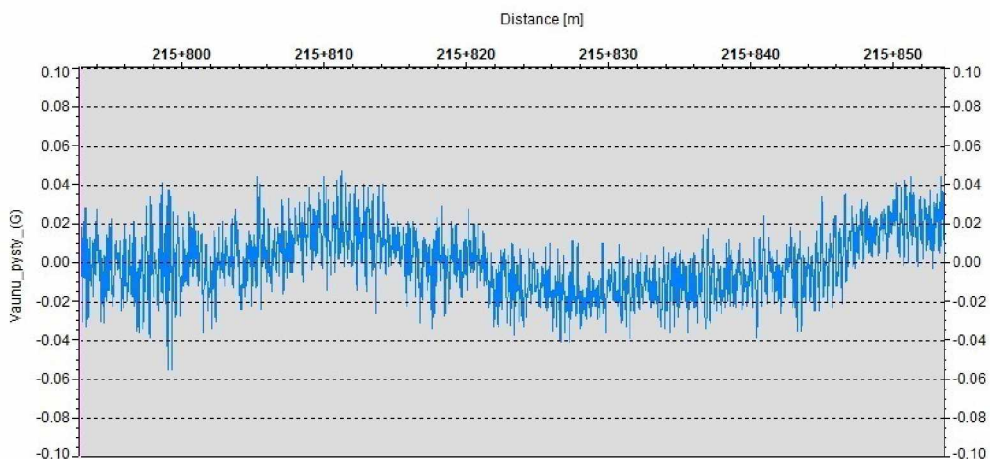


Kuva 6.9. Esimerkki telin tyypillisestä vaakakiihtyvyytkuvaajasta.

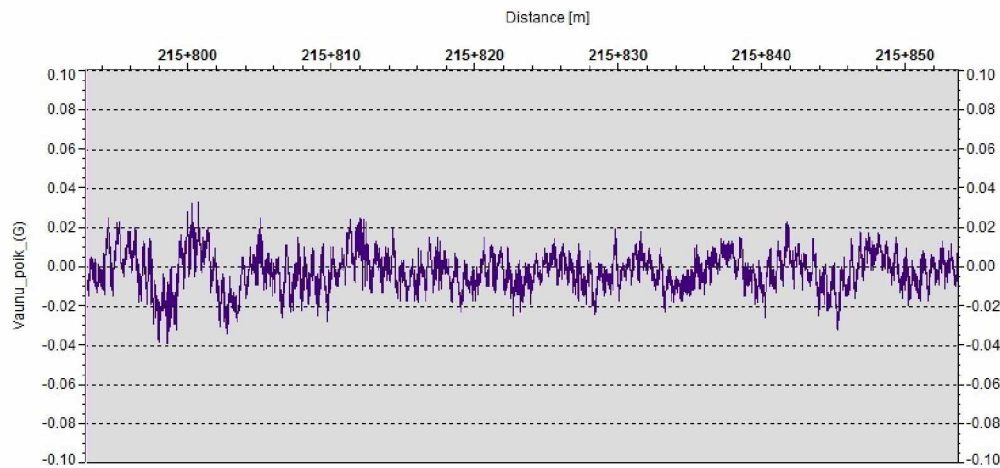


Kuva 6.10. Esimerkki telin tyypillisestä radansuuntaisesta kiihtyvyytkuvaajasta.

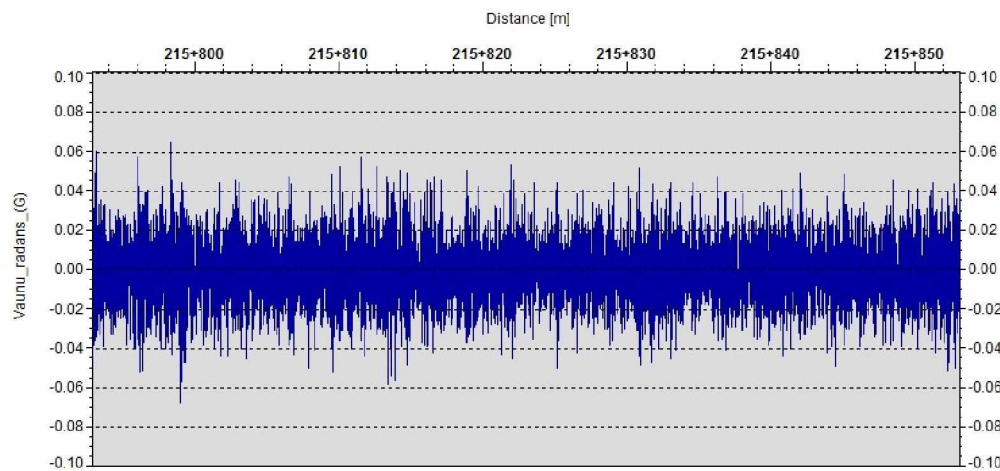
Kuvissa 6.11–6.13 on tyypillisiä esimerkkejä vaunun kiihtyvyyksistä suoralla rataosuudella junan nopeuden ollessa 140 km/h. Vaunun pystysuuntaisen kiihtyvyyden värähtelytaso on noin 0,05 g ja vaakasuuntaisen kiihtyvyyden noin 0,02–0,03 g. Radansuuntaisen kiihtyvyyden värähtelytaso on esimerkkikuvassa noin 0,06 g.



Kuva 6.11. Esimerkki vaunun tyypillisestä pystysuuntaisesta kiihtyvyytkuvaajasta.



Kuva 6.12. Esimerkki vaunun tyypillisestä vaakakiihtyvyysskuvaajasta.



Kuva 6.13. Esimerkki vaunun tyypillisestä radansuuntaisesta kiihtyvyysskuvaajasta.

Värähtelytaso tasaisella rataosuudella on telissä noin 50-kertainen ja pyöräkerrassa noin 200–1000-kertainen verrattuna vaunun värähtelytasoon. Kuvaajista huomataan, että vaunun vaaka- ja pystykiihtyvyysskuvaajat eroavat muodoltaan selvästi pyöräkerran ja telin vaaka- ja pystykiihtyvyysskuvaajista. Kuvissa 6.11 ja 6.12 värähtely on aaltomaista ja kiihtyvyyden muutokset ovat melko pieniä kiihtyvyyden arvoon nähden. Kuvaajia tarkastellessa voidaan myös huomata, että vaunun pysty- ja vaakasuuntaisessa kiihtyvyysskuvaajassa sekä telin vaakakiihtyvyysskuvaajassa kiihtyvyyden muutokset eivät ole yhtä nopeita kuin muissa kuvaajissa. Vaunussa oleva matkustaja ei koe epämiellyttävänä niinkään junavaunun suurta kiihtyvyyttä kuin junavaunun suurta kiihtyvyyden muutosnopeutta. Siksi vaunussa kiihtyvyyden muutosnopeuden eli nykäyksen (*jerk*) olisi hyvä olla mahdollisimman pieni.

Seuraavissa taulukoissa 6.1–6.5 on lueteltu eri rataosuuksien keskimääräinen värähtelytaso pyöräkerrassa, telissä ja vaunussa. Taulukoiden keskimääräisellä värähtelytasolla tarkoitetaan suoran ja jatkuvan rataosuuden keskimääräisiä kiihtyvyyshuippuja. Osuuksilla on myös näistä arvoista poikkeavia suurempia arvoja, mutta suurin osa suoran rataosuuden arvoista sijoittuu taulukoissa mainittujen arvojen alapuolelle. Keskimääräinen värähtelytaso on arvioitu eri rataosuuksilla aina sellaisista kohdista, joissa junan nopeus on ollut 140 km/h.

Taulukko 6.1. Keskimääräinen värähtelytaso suoralla linjaosuudella Tikkurila–Lahti-välillä.

	pyöräkerta (g)	teli (g)	vaunu (g)
pystykiikkyvyys	10–12	2-3	0,05
vaakakiikkyvyys	20	1-2	0,02–0,03
radansuunt. kiikkyvyys	-	2-3	0,04–0,06

Taulukko 6.2. Keskimääräinen värähtelytaso suoralla linjaosuudella Lahti–Kouvola-välillä.

	pyöräkerta (g)	teli (g)	vaunu (g)
pystykiikkyvyys	10–15	3	0,05
vaakakiikkyvyys	20	1-1,5	0,02–0,03
radansuunt. kiikkyvyys	-	4	0,06

Taulukko 6.3. Keskimääräinen värähtelytaso suoralla linjaosuudella Kouvola–Lappeenranta-välillä.

	pyöräkerta (g)	teli (g)	vaunu (g)
pystykiikkyvyys	10	2-3	0,05
vaakakiikkyvyys	20	1-1,5	0,02–0,03
radansuunt. kiikkyvyys	-	3-3,5	0,05–0,06

Taulukko 6.4. Keskimääräinen värähtelytaso suoralla linjaosuudella Lappeenranta–Parikkala-välillä.

	pyöräkerta (g)	teli (g)	vaunu (g)
pystykiikkyvyys	10	2–3	0,05–0,07
vaakakiikkyvyys	20–30	2	0,05
radansuunt. kiikkyvyys	-	2–3	0,05–0,06

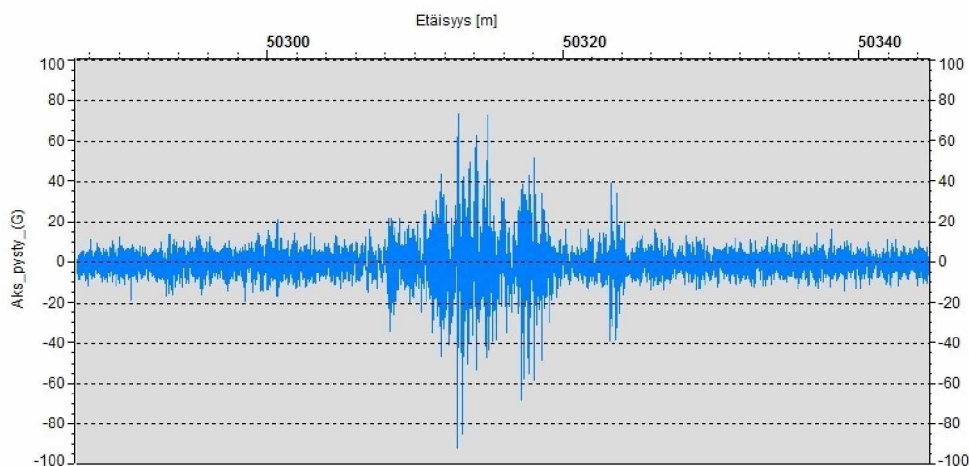
Taulukko 6.5. Keskimääräinen värähtelytaso suoralla linjaosuudella Parikkala–Joensuu-välillä.

	pyöräkerta (g)	teli (g)	vaunu (g)
pystykiikkyvyys	15	3–4	0,10
vaakakiikkyvyys	25	3–4	0,05
radansuunt. kiihtyvyys	-	4	0,07

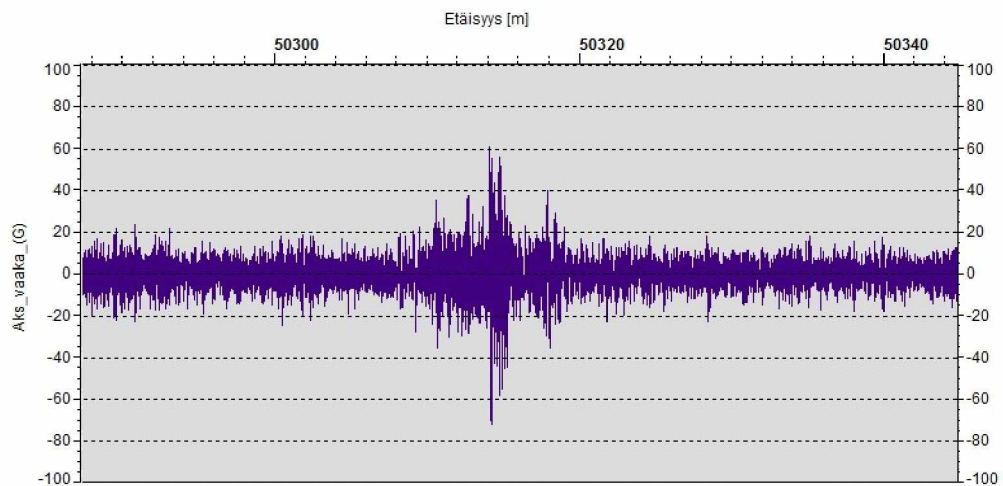
Helsinki–Lappeenranta-välillä kaikkien rataosuuksien keskimääräiset kiihtyvyydet ovat samaa luokkaa. Lappeenranta–Joensuu-välillä keskimääräiset kiihtyvyydet kasvavat Joensuuta kohti kuljettaessa, ja Parikkala–Joensuu-välillä kiihtyvyydet ovat suurempia kuin Lappeenranta–Parikkala-välillä. Nämä ovat kuitenkin vain silmämääräisiä arvioita eri rataosuuksille, ja eri rataosuuksien kunnollinen vertailu vaatisi tarkempaa värähtelyanalyysia.

6.2.2 Vaihteiden aiheuttama tyypillinen värähtely junakalustossa

Seuraavaksi värähtelyiden analysoinnissa on keskitytty tarkastelemaan vaihteiden aiheuttamia värähtelyitä. Vaihteiden värähtelyiden analysoinnissa on kirjattu ylös aina vaihteen aiheuttama suurin värähtelyamplitudi. Vaihteiden tarkastelussa ei ole huomioitu esimerkiksi värähtelyn kestoa tai taajuussisältöä. Vaihteiden aiheuttamien värähtelyiden osalta on tarkasteltu kahta eri vaihdetyyppiä, pitkää vaihdetta YV60-900-1:18 ja lyhyttä vaihdetta YV60-300-1:9. Molempien vaihdetyyppien tapauksessa on tarkasteltu erityisesti junan pyöräkerran pysty- ja vaakakiikkyvyyksiä, ja esimerkiksi kuvissa on esitelty tyypilliset tapaukset pitkän ja lyhyen vaihteen aiheuttamista kiihtyvyyksistä pyöräkerrassa. Kaikki tulokset on saatu vaihteista suoraan ajettaessa. Kuvissa 6.14 ja 6.15 on tyypilliset esimerkit junan pyöräkerran pysty- ja vaakakiikkyvyyden värähtelytasosta pitkässä vaihteessa junan kulkiessa nopeudella 140 km/h myötävaihteeseen. Maksimikiikkyvydet saavutetaan sekä pysty- että vaakakiikkyvyyden osalta samassa kohdassa, ja pystysuunnassa maksimikiikkyvyys on suurempi. Vaihte aiheuttaa selvän poikkeaman värähtelytasoon sekä vaaka- että pystykiikkyvyyden tapauksessa.

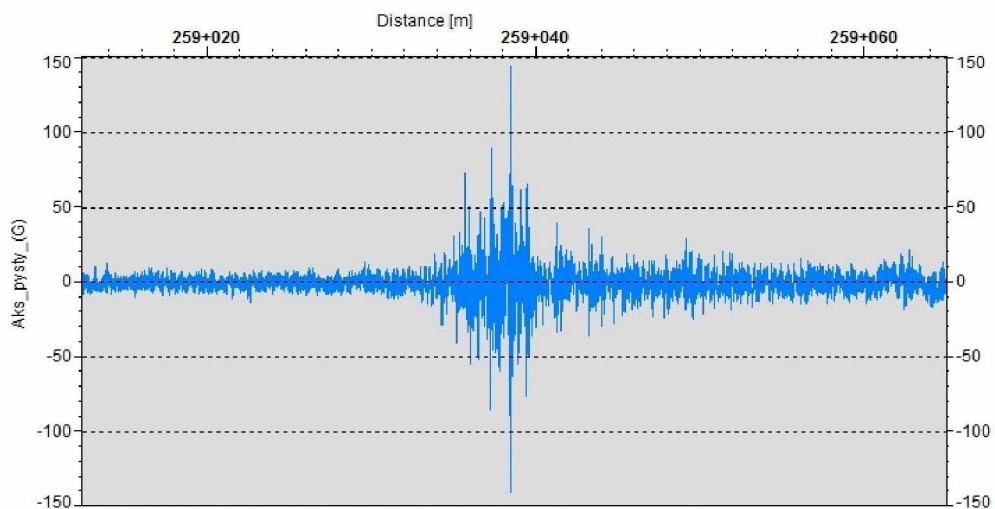


Kuva 6.14. Esimerkki pyöräkerran pystykiikkyvyydestä pitkässä vaihteessa.

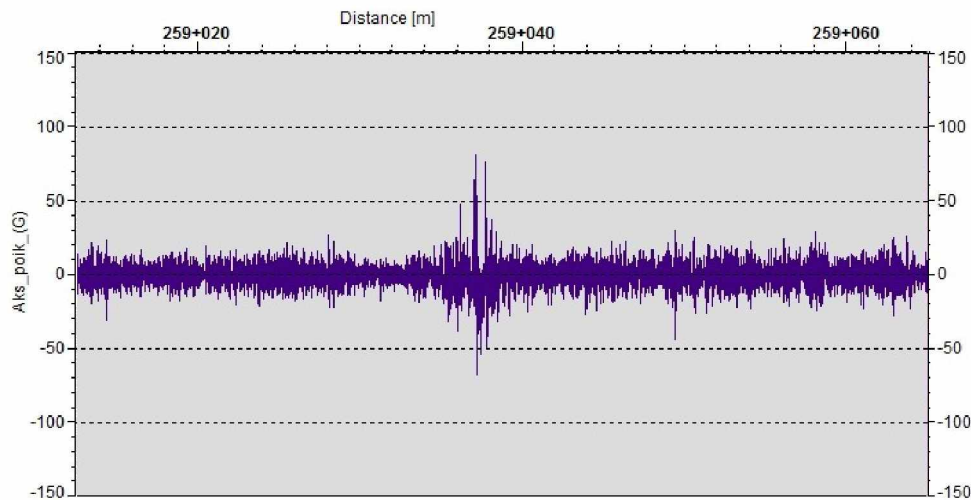


Kuva 6.15. Esimerkki pyöräkerran vaakakiihtyvyydestä pitkässä vaihteessa.

Kuvissa 6.16 ja 6.17 on tyypilliset esimerkit junan pyöräkerran pysty- ja vaakakiihtyvyydestä lyhyessä vaihteessa junan nopeuden ollessa 140 km/h. Tässäkin tapauksessa juna on kulkenut myötävaihteeseen. Maksimikiihtyvyydet saavutetaan jälleen suunnilleen samassa kohdassa, ja pystykiihtyvyyden maksimiarvo on suurempi.



Kuva 6.16. Esimerkki pyöräkerran pystykiihtyvyydestä lyhyessä vaihteessa.

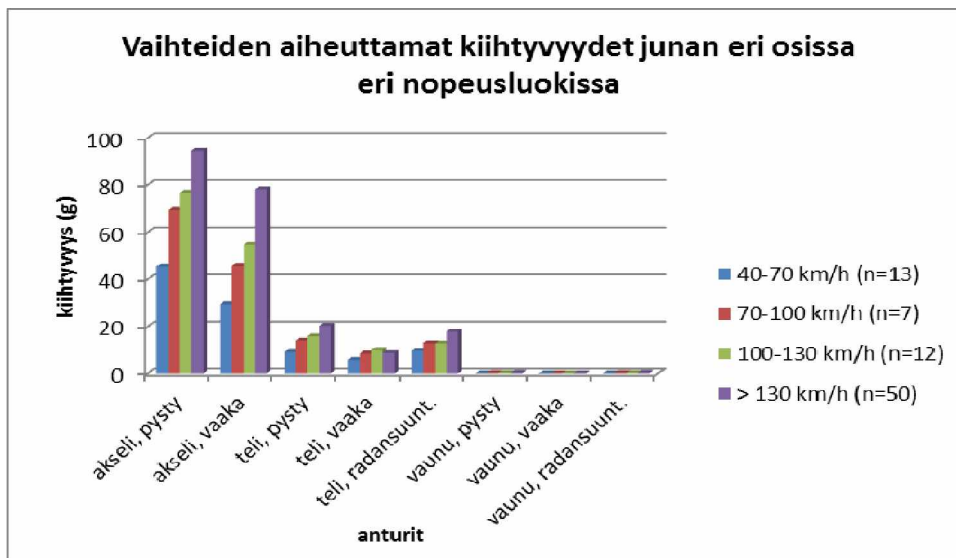


Kuva 6.17. Esimerkki pyöräkerran vaakakiihtyvyydestä lyhyessä vaihteessa.

Myös lyhyen vaihteen tapauksessa vaihte aiheuttaa selvän poikkeaman normaaliin värähtelytasoon sekä pysty- että vaakasuuntaisessa kiihtyvyysskuvaajassa.

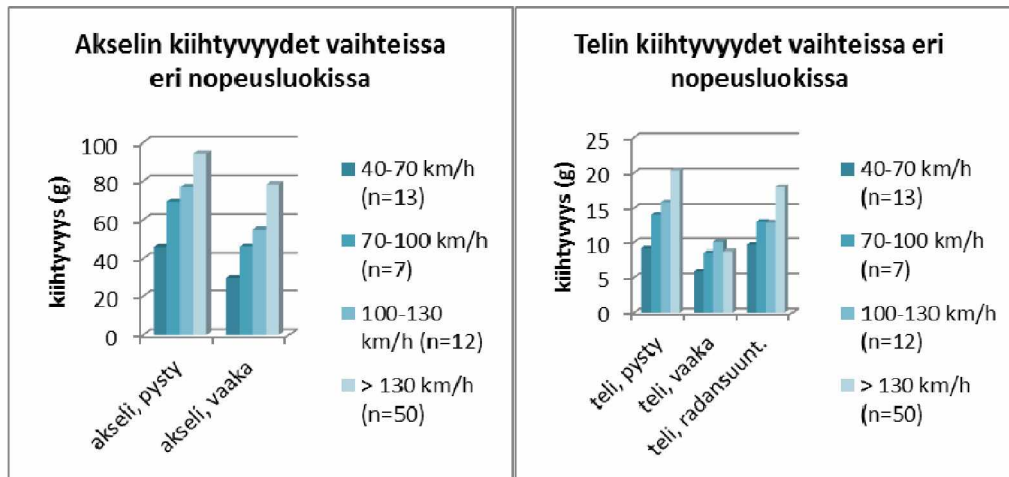
6.2.3 Junan nopeuden vaikutus vaihteiden aiheuttamaan värähtelyyn

Kulkunopeudet kaikissa tarkastelluissa vaihteissa on jaoteltu neljään eri nopeusluokkaan, joiden avulla nähdään nopeuden vaikutus värähtelyyn. Kuvassa 6.18 on tarkasteltu keskimääräistä vaihteen aiheuttamaa maksimivärähtelyä eri nopeusluokissa.



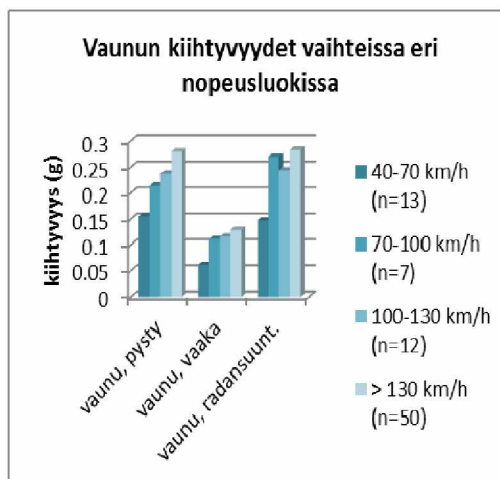
Kuva 6.18. Vaihteiden aiheuttamat kiihtyvyydet eri nopeusluokissa.

Kuvissa 6.19–6.21 on esitetty tarkemmin vaihteen aiheuttamat keskimääräiset maksimikiihtyvyydet eri nopeusluokissa pyöräkerrassa, telissä ja vaunussa. Kuvista 6.18–6.21 voidaan huomata, että junan nopeudella on selvä vaikutus keskimääräiseen maksimivärähtelyyn kaikissa tarkastelupisteissä. Lähes jokaisessa mittauspisteessä kiihtyvyyden keskimääräinen maksimiamplitudi kasvaa siirryttäessä suurempaan nopeusluokkaan. Kun junan nopeus kasvaa, vaihteen epäjatkuvuuskohta aiheuttaa siis junaan suuremmat kiihtyvyydet.



Kuva 6.19. Kiihtyvyydet pyöräkerrassa.

Kuva 6.20. Kiihtyvyydet telissä.



Kuva 6.21. Kiihtyvyydet vaunussa.

Taulukossa 6.6 on esitetty kuvien 6.18–6.21 kiihtyvyyssarvot. Taulukon arvot on ilmoitettu yksikössä g, sillä sitä on käytetty kiihtyvyyden yksikkönä mittauksissa.

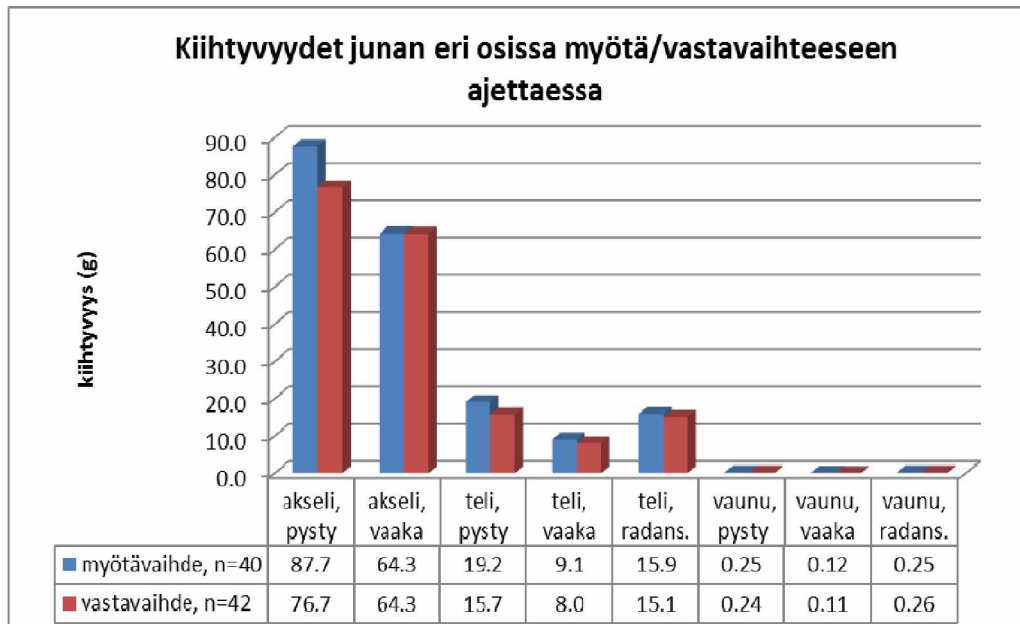
Taulukko 6.6. Vaihteiden aiheuttamat keskimääräiset maksimikiikityvyysamplitudit eri nopeusluokissa.

Kiihtyvyyden maksimiampplitudit	40–70 km/h	70–100 km/h	100–130 km/h	yli 130 km/h
Akseli, pysty-kiihtyvyys (g)	45,5	69,6	76,8	94,5
Akseli, vaaka-kiihtyvyys (g)	29,6	45,7	54,8	78,2
Teli, pystykiihtyvyys (g)	9,2	14,1	15,9	20,4
Teli, vaakakiihtyvyys (g)	5,9	8,6	10,1	8,8
Teli, radansuunt. kiihtyvyys (g)	9,7	13,0	12,9	17,9
Vaunu, pysty-kiihtyvyys (g)	0,16	0,21	0,24	0,28
Vaunu, vaaka-kiihtyvyys (g)	0,06	0,11	0,12	0,13
Vaunu, radansuunt. kiihtyvyys (g)	0,15	0,27	0,24	0,28

Näissä tarkasteluissa ovat olleet mukana kaksi eri vaihdetyyppiä, YV60-900-1:18 ja YV60-300-1:9, joista on useimmiten ajettu yli vähintään nopeudella 130 km/h. Lyhyessä vaihteessa keskinopeus on ollut 101 km/h (mediaani 134 km/h) ja pitkässä vaihteessa 123 km/h (mediaani 135 km/h). Kahta eri vaihdetyyppiä tarkasteltiin myös erikseen, jolloin molemmille löytyi vastaava yhteys junan nopeuden ja värähtelytason välillä. Tällä lisätarkastelulla varmistettiin, että junan nopeudella todella on yhteys junan värähtelyihin. Yhteys nopeuden ja värähtelytason välillä on niin selvä, että sen voidaan olettaa pätevän mittausvaunun lisäksi myös muilla vaunutyypeillä.

2.5.3 Junakaluston värähtely myötä- ja vastavaihteeseen ajettaessa

Seuraavaksi on tarkasteltu, miten myötä- ja vastavaihteeseen ajo vaikuttaa värähtelyyn. Vaihteet jaoteltiin myötä- ja vastavaihteisiin, jonka jälkeen junan kiihtyvyyksiä tarkasteltiin kummassakin tapauksessa erikseen. Kuvassa 6.22 on esitetty kiihtyvyydet junan eri osissa myötä- ja vastavaihteeseen ajettaessa.



Kuva 6.22. Kiihtyvyydet junan eri osissa myötä- ja vastavaihteeseen ajettaessa.

Myötävaihteeseen ajettaessa keskimääräiset maksimikiihtyvyydet ovat kuvan 6.22 mukaan yleensä korkeammat kuin vastavaihteeseen ajettaessa, mutta ero ei ole kovin suuri. Lisäksi myötävaihteeseen kuljettaessa junan keskinopeus on ollut tarkasteltavien vaihteiden kohdalla 120,25 km/h kun vastavaihteeseen kuljettaessa keskinopeus on ollut 115,5 km/h. Todennäköisesti kiihtyvyyssamplitudierot johtuvat siis lähinnä junien nopeuseroista eivätkä niinkään eroavaisuuksista myötä- tai vastavaihteeseen ajon suhteen. Myötä- ja vastavaihteen eroja oli syytä tarkastella tietyllä nopeusvälillä tarkemman arvion saamiseksi. Tarkastelu tehtiin vielä nopeusvälillä 130–145 km/h, jolloin sekä myötä- että vastavaihteeseen ajettaessa keskimääräinen nopeus on ollut 138 km/h. Tällöin keskimääräiset maksimikiihtyvyyssarvot olivat myötä- ja vastavaihteen tapauksissa suunnilleen samat. Myötä- ja vastavaihteen välillä ei siis ole selvää eroa kiihtyvyyden maksimiampplitudin suhteen, mutta eroa voi silti olla esimerkiksi värähtelyn taajuuksien tai värähtelyn keston suhteen. Tässä tarkastelussa vertailu on suoritettu ainoastaan värähtelyn maksimiampplitudin suhteen.

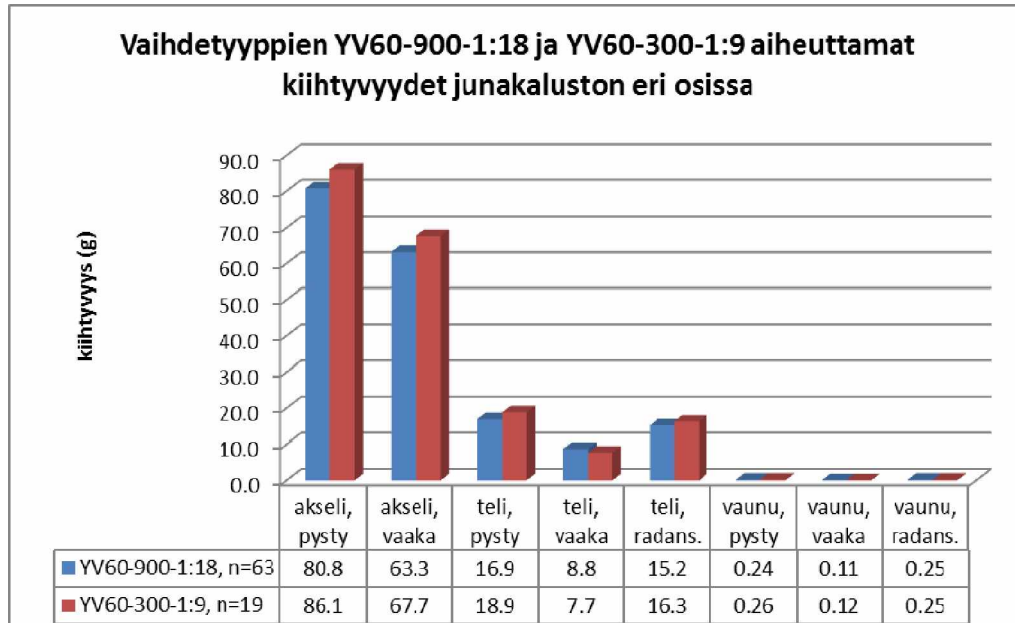
6.2.4 Muut vaihteiden aiheuttamaan värähtelyyn vaikuttavat asiat

Kiihtyvyydatasta arvioitiin myös vaihteen puolisuuden vaikutusta vaihteen aiheuttamiin värähtelyihin. Vaihteen puolisuudella tarkoitetaan sitä, poikkeako vaihteesta vastavaihteeseen katsottuna vasemmalle vai oikealle. Tällä tarkastelulla haluttiin lähinnä selvittää, vaikuttaako kiihtyvyyssantureiden sijainti mittausvaunun vasemmalla puolella jotenkin tuloksiin. Vaihteen puolisuudella ei havaittu olevan merkitystä vaihteen aiheuttamaan maksimivärähtelyamplitudiin.

Jokaisessa tarkastelussa vaihteessa kirjattiin ylös myös vaihteen asennusvuosi. Asennusvuodet vaihtelivat välillä 1990–2011. Vaihteet jaoteltiin asennusvuoden perusteella neljään eri vuosiluokkaan, jonka jälkeen tarkasteltiin vaihteen aiheuttamia kiihtyvyyksiä eri luokissa. Vaihteen asennusvuoden merkitystä vaihteen aiheuttamiin värähtelyihin ei tämän selvityksen perusteella pystytäkään kertomaan, sillä junan ajonopeus eri vuosiluokkien vaihteissa vaihteli huomattavasti. Vanhemmissa vaihteissa junan keskinopeus (64 km/h) on ollut merkittävästi pienempi kuin uudemmissa vaihteissa (138 km/h). Tämän vuoksi kiihtyvyyksien keskimääräisiin arvoihin eri asennus-

vuosiluokissa vaikuttavat selvästi junan nopeudet eikä tuloksista pysty tämän tarkastelun perusteella erottamaan vaihteen asennusvuoden merkitystä arvoihin.

Viimeiseksi eri vaihdetyyppejä YV60-900-1:18 ja YV60-300-1:9 verrattiin keskenään. Vaihteet jaoteltiin vaihdetyypin mukaan, ja kiihtyvyyksiä tarkasteltiin kummassakin vaihdetyypissä erikseen. Kuvassa 6.23 on esitetty vaihdetyyppien aiheuttamat kiihtyvyydet junan eri osissa.



Kuva 6.23. Vaihdetyyppien aiheuttamat kiihtyvyydet junan eri osissa.

Lyhyt vaihde YV60-300-1:9 aiheuttaa keskimäärin hieman suuremmat maksimikiihtyvyydet junakalustoon kuin pitkä vaihde YV60-900-1:18. Lyhyeen vaihteeseen kuljettaessa keskinopeus on ollut 101,2 km/h, kun pitkässä vaihteessa keskinopeus on ollut 122,8 km/h. Aiemmin on jo selvinnyt, että suurempi nopeus aiheuttaa suuremmat kiihtyvyyssarvot. Tästä huolimatta lyhyessä vaihteessa maksimikiihtyvyydet ovat olleet suurempia, jolloin erojen voidaan päätellä johtuvan nimenomaan vaihdetyypeistä. Mikäli keskinopeudet olisivat molemmissa samoja, olisi maksimikiihtyvyyksien välinen ero todennäköisesti vielä selvempi. Vaihdetyyppi YV60-300-1:9 aiheuttaa siis tämän tutkimuksen perusteella hieman suuremmat kiihtyvyydet liikkuvaan kalustoon kuin vaihdetyyppi YV60-900-1:18.

Vaihteissa kumpaankin suuntaan kuljettaessa suurimmat kiihtyvyyssamplitudit vaikutti aiheuttavan risteyksen kärjen kohdalla sijaitseva raiteen epäjatkuvuuskohta (H kuvassa 4.9). Vaihteen aiheuttamat kiihtyvyydet junan eri osissa olivat noin 4–10-kertaiset verrattuna suoran jatkuvan rataosuuden aiheuttamiin kiihtyvyyksiin.

6.2.5 Muiden epäjatkuvuuskohtien aiheuttama värähtely junakalustossa

Vaihteiden lisäksi kiihtyvyydatasta tarkasteltiin hieman myös muiden epäjatkuvuuskohtien aiheuttamaa värähtelytasoa. Tasoristeysten aiheuttama värähtelytaso oli usein vastaava kuin vaihteissa, tasoristeyksestä riippuen 1–10-kertainen suoran rataosuuden värähtelytasoon nähden. Muutamissa tapauksissa tasoristeysten aiheuttama värähtely ei juuri poikennut suoran rataosuuden värähtelytasosta.

Siltojen aiheuttama värähtelytaso vaihteli myös melko paljon. Joskus siltojen kohdalla junan värähtely ei juuri poikennut suoran rataosuuden värähtelytasosta, toisinaan värähtely oli jopa samalla tasolla kuin vaihteissa. Reitillä oli erityyppisiä ja erikokoisia siltoja, ja siksi myös siltojen aiheuttamat värähtelytasot vaihtelivat selvästi. Yleisesti ottaen siltojen kohdalla värähtely oli 1–4-kertainen suoran rataosuuden värähtelytasoon verrattuna.

Kiskojaatkoskohtia ei tässä tarkastelussa pystytty erottamaan suoran rataosuuden värähtelykäyttäytymisestä, ja kiskojaatkoskohtien tarkastelu vaatisikin tarkempaa kiihtyvyyssdatan analysointia sekä tietoa jatkoskohtien sijainnista.

6.3 Laskentatulokset

Junan käyttäytymistä tarkasteltiin myös laskentaohjelman avulla. Vampire Pro -dynamiikkaohjelmalla on selvitetty luvussa 4 esiteltyjen matkustaja- ja tavaravaunun värähtelykäyttäytymistä. Vaunuille laskettiin ominaisvärähtelytaajuudet ja -muodot. Lisäksi ohjelmalla tarkasteltiin erilaisten kiskon epäjatkuvuuskohtien vaikutusta vaunuihin. Näiden epäjatkuvuuskohtien aiheuttamia värähtelyitä on tarkoitettu vertailla mittaamalla saatuihin vaihteiden aiheuttamiin värähtelyihin. Vaihteiden värähtelyanalyysissä keskityttiin maksimikiihtyvyyssamplitudiin, joten myös kiskojaatkoksen ja kiskopompun värähtelyissä on tarkasteltu maksimikiihtyvyyssamplitudeja. Dynamiikkaohjelmalla saadut kiihtyvyydet on ilmoitettu aina kuvaajissa yksikössä m/s^2 . Taulukoissa kiihtyvyydet on ilmoitettu sekä yksikössä g että yksikössä m/s^2 .

Pyörän ja kiskon kontaktin laskennassa on käytetty pyöräprofiilina S 1002 -profiilia ja kiskoprofiilina UIC60-20 -profiilia.

6.3.1 Ominaismuodot

Matkustaja- ja tavaravaunulle tehtiin ominaismuotoanalyysi, jonka avulla saatiin selville vaunutyyppien ominaisvärähtelytaajuudet ja niitä vastaavat ominaisvärähtelymuodot. Matkustajavaunun kaksitoista alinta ominaistaajuutta sekä niitä vastaavien vaunun ominaismuotojen nimitykset on esitetty taulukossa 6.7.

Taulukko 6.7. Matkustajavaunun alimmat ominaistajuuudet ja vastaavien ominaismuotojen nimitykset.

i	i:s ominaistajuus f (Hz)	ominaismuoto
1	0	-
2	0	-
3	0,196	-
4	0,375	lower center roll
5	0,669	bounce
6	0,709	yaw
7	0,805	pitch
8	1,048	upper center roll
9	3,658	-
10	4,036	-
11	4,037	-
12	4,398	-

Taulukossa 6.7 esitettyjen ominaistajuuksien lisäksi mallin vaunulla on vielä 20 korkeampaa ominaistajuutta, sillä mallissa on käytetty 32 vapausastetta. Alimmat ominaistajuuudet ovat kuitenkin yleensä laskennan kannalta olennaisempia, ja siksi tässä vaiheessa on keskitytty tarkastelemaan alimpia ominaisvärähtelymuotoja. Useille ominaismuodoille löytyi vastaavuus kuvassa 4.3 esitetyistä vaunun ominaismuodoista, ja nämä on nimetty taulukossa 6.7. Loput ominaismuodot, joita ei ole erikseen nimetty, liittyvät telin tai pyöräkertojen liikkeisiin.

Matkustajavaunun ominaismuodot yksinkertaisemmalle värähtelymallille laskettiin aiemmin luvussa 4. Tuloksista erottui parhaiten bounce-värähtelymuoto, jonka ominaistajuudeksi saatiin $f = 1,27$ Hz. Tässä tarkemmassa mallissa bounce-värähtelymuodon ominaistajuudeksi saatiin $f = 0,67$ Hz. Tulokset eivät täysin vastaa toisiaan, mikä todennäköisesti johtuu laskentamallien eroavaisuuksista. Dynamiikkaohjelmassa käytetyssä mallissa oli enemmän vapausasteita, ja siksi kyseisellä mallilla saadut tulokset ovat tarkempia.

Vastaava ominaismuotoanalyysi tehtiin myös tavaravaunulle. Tavaravaunun kaksitoista alinta ominaistajuutta sekä niitä vastaavien vaunun ominaismuotojen nimitykset on esitetty taulukossa 6.8.

Taulukko 6.8. Tavaravaunun alimmat ominaistaajuudet ja niitä vastaavat ominaismuodot.

i	i:s ominaistaajuus f (Hz)	ominaismuoto
1	0,001	-
2	0,001	-
3	0,001	-
4	0,001	-
5	0,157	-
6	0,688	lower center roll
7	1,346	yaw
8	1,414	bounce
9	1,513	upper center roll
10	1,671	pitch
11	13,573	-
12	13,573	-

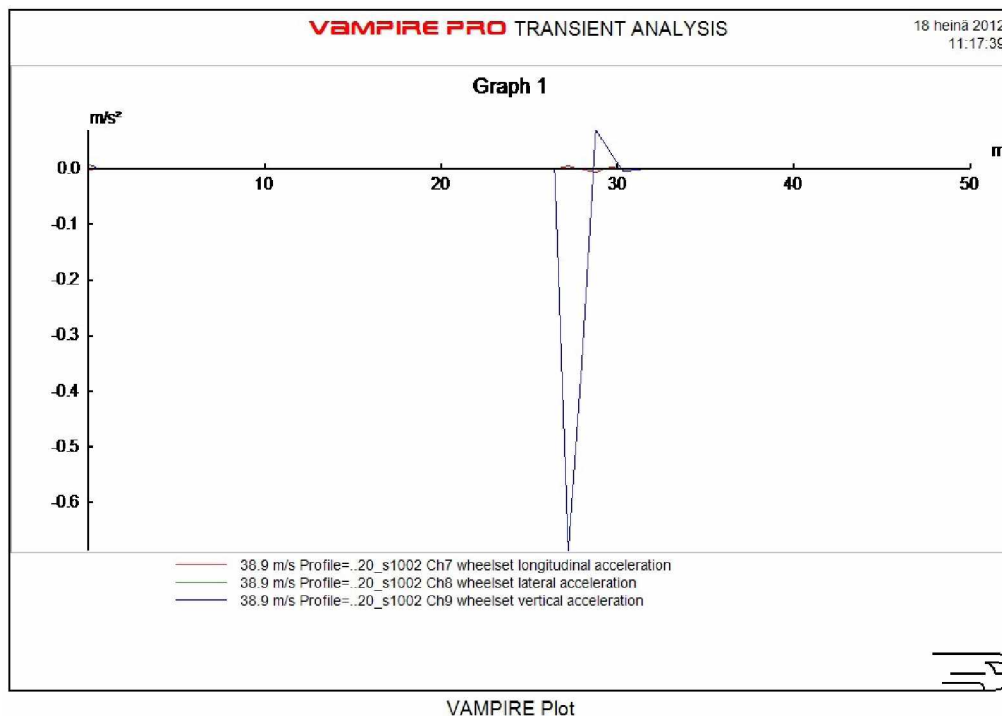
Tavaravaunun mallissa on käytetty 22 vapausastetta, joten taulukossa esitettyjen lisäksi korkeampia ominaistaajuuksia on vielä kymmenen. Taulukkoon on nimetty vaunun ominaismuotojen nimitykset kuvan 4.3 mukaisesti. Loput ominaismuodot liittyvät pyöräkertojen liikkeeseen tai pyöräkertojen ja vaunun yhdistettyyn liikkeeseen.

Kummastakin mallista löytyivät siis kaikki kuvassa 4.3 esitetyt vaunun ominaisvärähtelymuodot. Ominaistaajuus, jolla tietty ominaismuoto esiintyy, riippuu kuitenkin värähtelymallista. Matkustajavaunun mallissa ominaismuodot esiintyvät eri ominaistaajuuksilla kuin tavaravaunussa. Matkustajavaunussa eri ominaismuotoja vastaavat ominaistaajuudet ovat alhaisempia kuin tavaravaunun mallissa.

6.3.2 Kiskojahtkos

Kiskojahtkoskohtaa on mallinnettu dynamiikkaohjelmassa 21 mm pituisella ja 10 mm syvällä lovella. Jatkoskohta on sijoitettu radalla viiden metrin kohdalla molemmille kiskoille. Kiskojahtkoskohdan yli on ajettu ensin matkustajavaunulla, jonka esimerkkinä laskuissa toimii yksikerroksinen IC-vaunu eli Ex-vaunu. Kuvassa 6.24 nähdään kiskojahtkoskohdan aiheuttamat kiihtyvyydet radansuunnassa sekä vaaka- ja pystysuunnassa matkustajavaunun pyöräkerrassa. Nopeutena on käytetty 38,9 m/s eli 140 km/h. Kuvan vaaka-akselilla oleva matka kuvaa ensimmäisen pyöräkerran etäisyyttä

lähtöpisteestä. Kiskojatkos on sijoitettu radalla viiden metrin kohdalle molemmilla kiskoilla. Anturit on sijoitettu taaimpaan pyöräkertaan, eli anturoitu pyöräkerta kulkee kiskopumpun yli noin 26,6 metrin kohdalla.

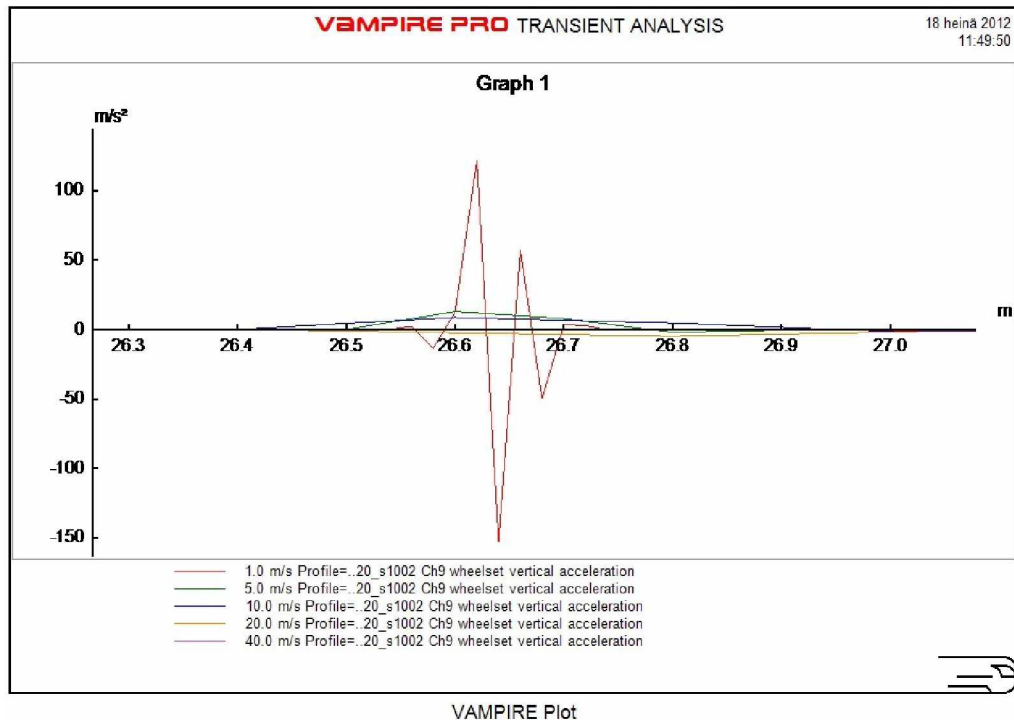


Kuva 6.24. Kiskojatkokohdan aiheuttamat kiihtyvyydet matkustajavaunun pyöräkerrassa nopeudella 140 km/h.

Kuvasta 6.24 huomataan heti, että pyöräkerran pystykiihtyvyys on selvästi suurempi kuin poikittaiskiihtyvyys tai radansuuntainen kiihtyvyys. Pyöräkerran suurin pystykiihtyvyys on $0,69 \text{ m/s}^2$ eli noin $0,07 \text{ g}$. Telissä suurin kiihtyvyys on pystysuunnassa $0,013 \text{ m/s}^2$ eli noin $0,001 \text{ g}$. Vaunussa maksimikiihtyvyyden arvo on radan suunnassa $0,50e-3 \text{ m/s}^2$ eli noin $5,05e-5 \text{ g}$.

Seuraavaksi tarkasteltiin nopeutta 20 m/s eli 72 km/h. Pyöräkerran suurimmaksi kiihtyvyyssamplitudiksi pystysuunnassa saatiin tällöin $4,85 \text{ m/s}^2$ eli noin $0,49 \text{ g}$. Telin suurin kiihtyvyys oli pystysuunnassa $0,187 \text{ m/s}^2$ eli noin $0,019 \text{ g}$. Vaunun suurimmaksi kiihtyvyydeksi saatiin pystysuunnassa $0,97e-3 \text{ m/s}^2$ eli noin $9,9e-5 \text{ g}$.

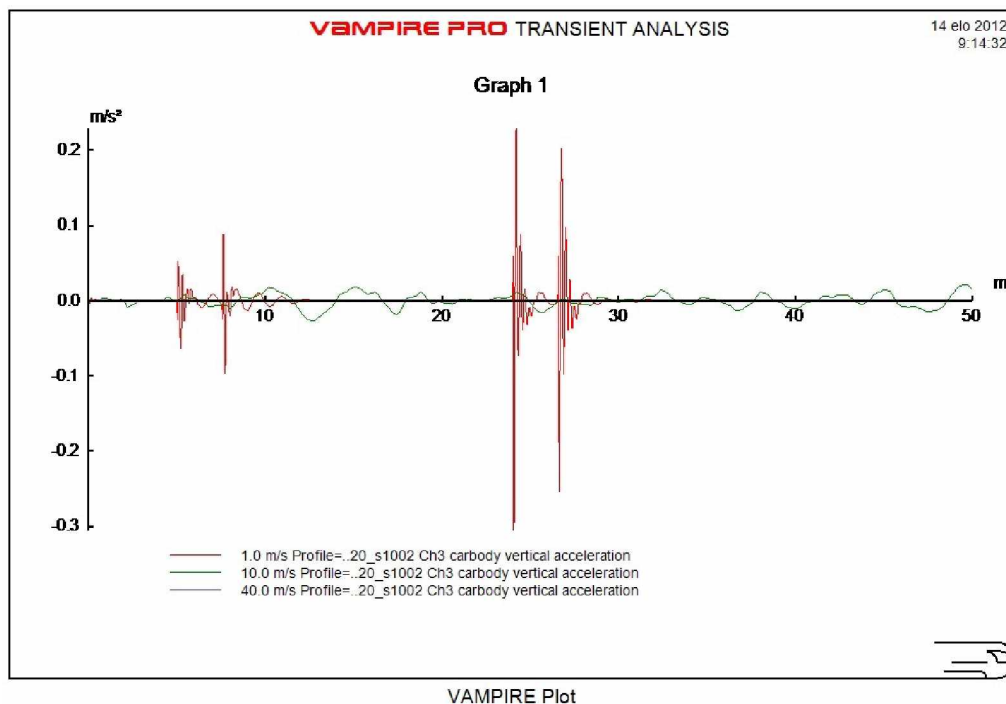
Kiihtyvyyksien arvot olivat hyvin pieniä, ja useimmiten pystysuuntaisen kiihtyvyyden arvo oli selvästi suurempi kuin poikittaiskiihtyvyyden tai radansuuntaisen kiihtyvyyden. Tästä eteenpäin tarkastelu rajattiinkin ainoastaan pyöräkerran, telin ja vaunun pystykiihtyvyyksiin. Lisäksi ajonopeuden laskiessa kiihtyvyyden arvot nousivat, joten oli syytä tarkastella kiihtyvyyksien arvoja myös pienemmillä nopeuksilla. Seuraavaksi tarkasteltiin pyöräkerran pystykiihtyvyyksiä eri ajonopeuksilla (kuva 6.25). Ajonopeuksina on käytetty 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s ja 40 m/s.



Kuva 6.25. Matkustajavaunun pyöräkerran pystykiihtyvyydet kiskoatkoskohdassa nopeuksilla 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s ja 40 m/s.

Kuvasta 6.25 huomataan, että pienemmillä nopeuksilla kiihtyvyyssamplitudi on selvästi suurempi. Värähtelykäyttäytyminen ei siis tässä tapauksessa vastaa aiemmin esitettyjä epäjatkuvuuskohdan iskuvoiman kaavoja 4.25 ja 4.26, joiden mukaan iskuvoima on suoraan verrannollinen junan nopeuteen. Toisaalta pienemmillä nopeuksilla värähtely vaimenee nopeammin. Värähtely alkaa poiketa normaalitasosta, kun anturoitu pyöräkerta ylittää kiskoatkoskohdan, eli noin 26,6 m kohdalla. Suurin pystykiihtyvyyssamplitudi on nopeudella 1 m/s saatu $151,2 \text{ m/s}^2$ eli noin 15,4 g. Tämä arvo on hyvin pieni verrattuna vaihteissa mitattuihin arvoihin eikä poikkea juuri lainkaan tasaisella suoralla radalla mitatuista pyöräkerran pystykiihtyvyyssarvoista. Tarkastellaan kuitenkin vielä vaunurungon pystykiihtyvyyksiä eri ajonopeuksilla.

Kuvassa 6.26 on esitetty matkustajavaunun pystykiihtyvyydet kiskoatkoskohdissa nopeuksilla 1 m/s, 10 m/s ja 40 m/s. Osa aiemmin käytetyistä nopeuksista on jätetty kuvasta pois, jotta kuvaaja olisi selkeämmin luettavissa. Vaunun kiihtyvyysskuvaajassa arvot alkavat poiketa normaalitasosta jo ensimmäisen pyöräkerran ylittäessä kiskoatkoksen, eli suunnilleen viiden metrin kohdalla. Punaisesta käyrästä ($v = 1 \text{ m/s}$) havaitaan hyvin jokaisen neljän pyöräkerran kiskoatkoskohdan ylitys. Nopeudella 10 m/s värähtelyamplitudit ovat jo selvästi pienempiä kuin nopeudella 1 m/s, mutta värähtely kestää pidempään. Nopeudella 40 m/s värähtelyamplitudit ovat jo niin pieniä, että niitä ei erota kuvasta. Tässäkin tapauksessa vaunun kiihtyvyyssamplitudit siis pienenevät selvästi ajonopeuden kasvaessa ja pienimmällä testatulla ajonopeudella värähtely vaimenee nopeammin kuin muilla.



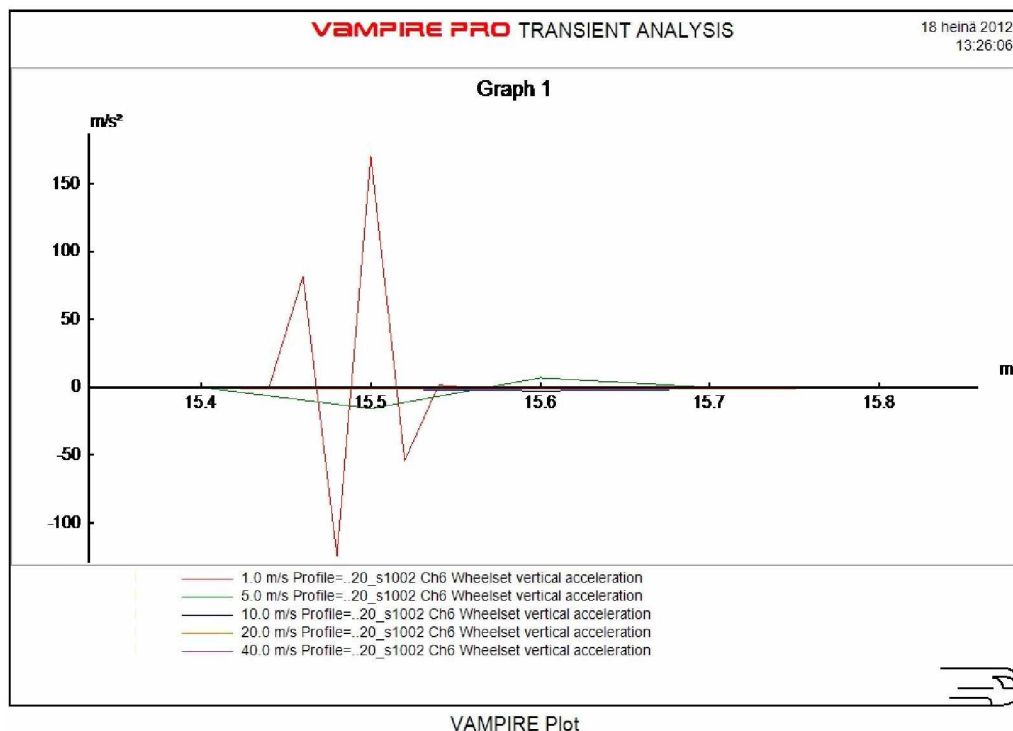
Kuva 6.26. Matkustajavaunun vaunurungon pystykiihtyvyydet kiskoatkoskohdassa nopeuksilla 1 m/s, 10 m/s ja 40 m/s.

Kiihtyvyyssamplitudien arvot on kerrottu tarkemmin taulukossa 6.9, josta löytyvät pyöräkerran ja vaunun arvojen lisäksi myös telin maksimiarvot. Arvoista nähdään selvästi, että matkustajavaunun ylittäessä kiskoatkoksen vaunun eri osiin kohdistuvat kiihtyvyydet pienenevät nopeuden kasvaessa.

Taulukko 6.9. Matkustajavaunun pyöräkerran, telin ja vaunun pystykiihtyvyyden maksimiarvot kiskoatkoksen kohdalla.

Nopeus (m/s)	Pystykiihtyvyyden maksimiarvo pyöräkerrassa		Pystykiihtyvyyden maksimiarvo telissä		Pystykiihtyvyyden maksimiarvo vaunussa	
	(m/s²)	(g)	(m/s²)	(g)	(m/s²)	(g)
1	153,2	15,6	27,7	2,8	0,31	0,03
5	12,9	1,3	0,45	0,05	0,075	0,008
10	8,7	0,9	0,35	0,04	0,028	0,003
20	4,8	0,5	0,19	0,02	0,97e-3	9,9e-5
40	1,0	0,1	0,026	0,003	0,36e-3	3,7e-5

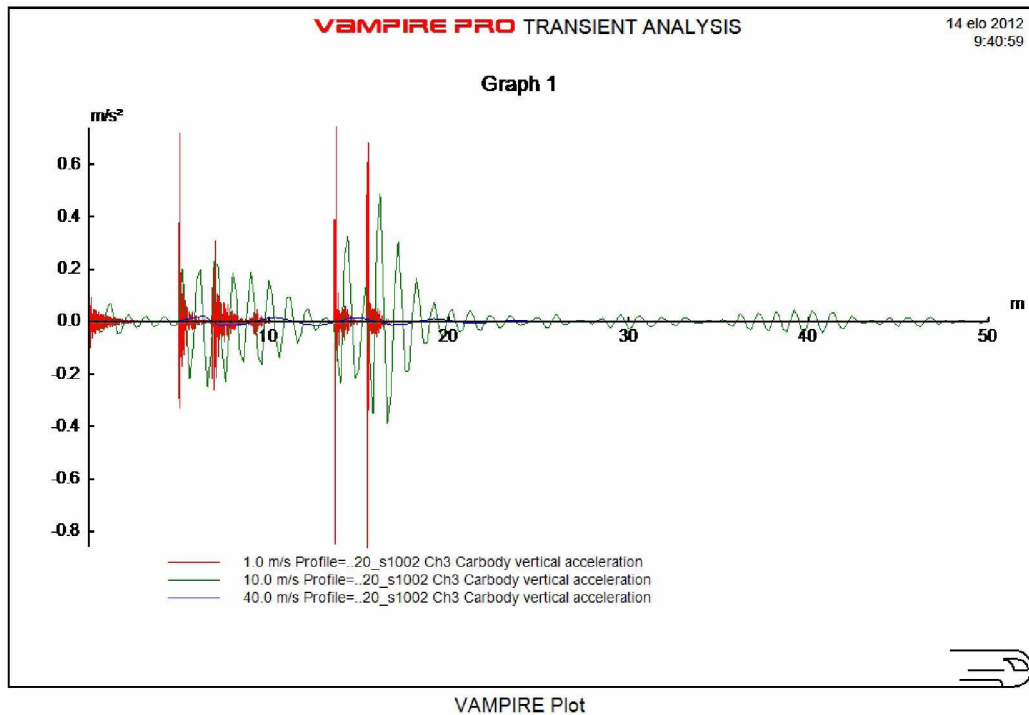
Seuraavaksi tarkasteltiin kiskoatkoksen aiheuttamia kiihtyvyyksiä Vok–vaunulle, jota on käytetty tavaravaunun esimerkkinä. Kiskoatkos on sijoitettu radalla edelleen viiden metrin kohdalle. Tavaravaunu on lyhyempi kuin matkustajavaunu, joten anturoitu pyöräkerta kulkee kiskoatkoksesta aiemmin. Anturit on sijoitettu jälleen taaimpaan pyöräkertaan, eli anturoitu pyöräkerta kulkee kiskopompusta noin 15,5 metrin kohdalla. Kuvassa 6.27 on esitetty pyöräkerran pystykiihtyvyydet tavaravaunulle nopeuksilla 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s ja 40 m/s.



Kuva 6.27. Tavaravaunun pyöräkerran pystykiihtyvyydet kiskoatkokskohdissa nopeuksilla 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s ja 40 m/s.

Myös tavaravaunun tapauksessa pienemmillä nopeuksilla maksimikiihtyvyyssamplitudit ovat suurempia. Tarkastetaan vielä, millaisia kiihtyvyyksiä kiskoatkoskohta aiheuttaa tavaravaunun runkoon.

Kuvassa 6.28 on esitetty vaunun pystykiihtyvyydet nopeuksilla 1 m/s, 10 m/s ja 40 m/s. Osa aiemmin käytetyistä nopeuksista on jätetty kuvasta pois, jotta kuvaaja olisi selkeämmin luettavissa. Vaunun kiihtyvyyssuureissa arvot alkavat poiketa normaaliarvoista jälleen jo ensimmäisen pyöräkerran ylittäessä kiskoatkoksen, eli suunnilleen viiden metrin kohdalla. Nopeudella 1 m/s saadut kiihtyvyyssamplitudit ovat selvästi suurempia kuin nopeudella 10 m/s saadut kiihtyvyyssamplitudit. Nopeudella 40 m/s kiihtyvyyssamplitudit ovat jo niin pieniä, että niitä ei erota kuvasta. Toisaalta nopeudella 1 m/s saadut kiihtyvyydet vaimenevat nopeammin kuin muut. Tässäkin tapauksessa vaunun kiihtyvyydet pienenevät siis selvästi ajonopeuden kasvaessa ja pienimmällä testatulla ajonopeudella värähtely vaimenee nopeimmin.



Kuva 6.28. Tavaravaunun vaunurungon pystykihtyvyydet kiskoatkoskohdassa nopeuksilla 1 m/s, 10 m/s ja 40 m/s.

Tarkemmat pystykihtyvyyssamplitudien maksimiarvot arvot löytyvät taulukosta 6.10.

Taulukko 6.10. Tavaravaunun pyöräkerran ja vaunun pystykihtyvyyden maksimiarvot kiskoatkoksen kohdalla.

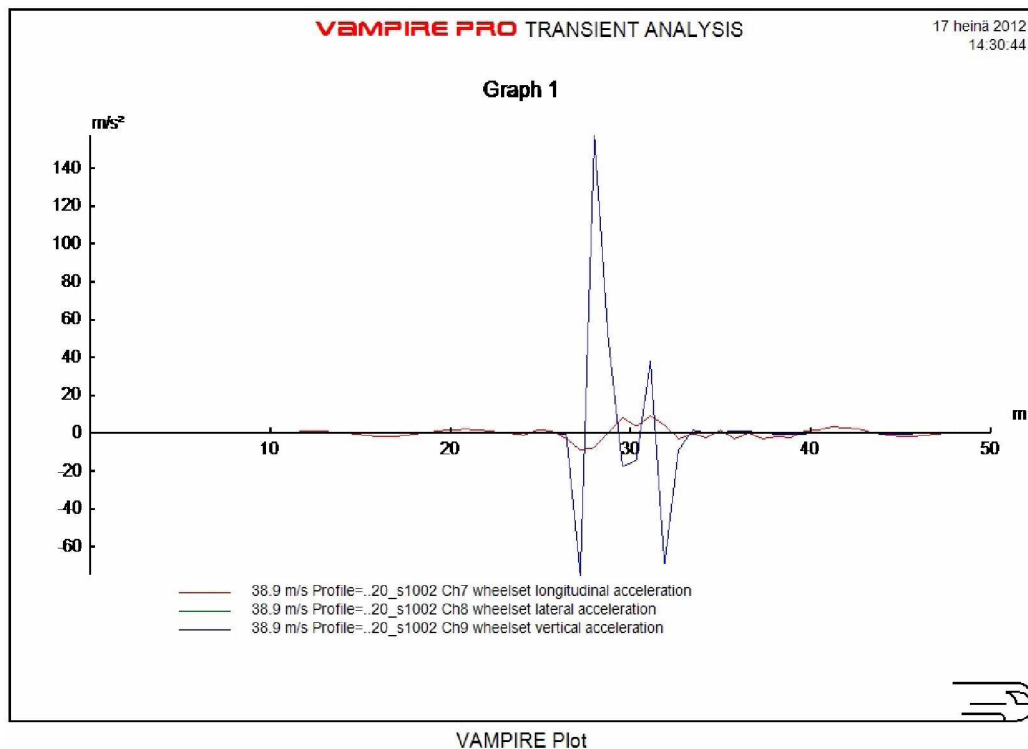
Nopeus (m/s)	Pystykihtyvyyden maksimiarvo		Pystykihtyvyyden maksimiarvo	
	pyöräkerrassa		vaunussa	
	(m/s^2)	(g)	(m/s^2)	(g)
1	170,5	17,4	0,86	0,088
5	15,6	1,6	0,59	0,060
10	2,6	0,26	0,49	0,050
20	1,6	0,16	0,27	0,028
40	0,02	0,002	0,022	0,002

Taulukon avulla nähdään selvästi pystykihtyvyyden maksimiarvojen pieneneminen nopeuden laskiessa. Kun nopeus on 5 m/s tai enemmän, kiihtyvyyksien arvot eivät juuri poikkea mittausvaunulle saadusta tyypillisestä tasaisen radan kiihtyvyydestä.

6.3.3 Kiskopomppu

Kiskopomppun mallina on käytetty tšekkiläistä kiskopomppua, jonka korkeus on 24 mm ja kulmamuuutos noin 11° (kuva 5.6). Tarkoituksena oli vertailla kiskopomppun aiheuttamia värähtelyitä vaihteiden ja kiskojohtokosten aiheuttamiin värähtelyihin. Vaihteessa mitattiin maksimivärähtelyamplitudeja mittausvaunun pyöräkerralle, telille ja vaunurungolle, joten myös kiskojohtoksen ja kiskopomppun tapauksessa keskityttiin maksimivärähtelyamplituideihin.

Aluksi tarkasteltiin kiskopomppun aiheuttamia maksimikihtyvyyksiä Ex-vaunulle, jota on käytetty matkustajavaunun esimerkkinä. Kiskopomppun yli on ajettu ensin nopeudella 38,9 m/s, joka vastaa nopeutta 140 km/h. Kuvassa 6.29 on esitetty kiihtyvyydet matkustajavaunun pyöräkerrassa vaunun ajaessa pomppun yli. Kuvan vaaka-akselilla oleva matka kuvaa ensimmäisen pyöräkerran etäisyyttä lähtöpisteestä. Kiskopomppu on sijoitettu radalla viiden metrin kohdalle molemmilla kiskoilla. Anturit on sijoitettu taampaan pyöräkertaan, eli anturoitu pyöräkerta kulkee kiskopomppun yli noin 26,6 metrin kohdalla.



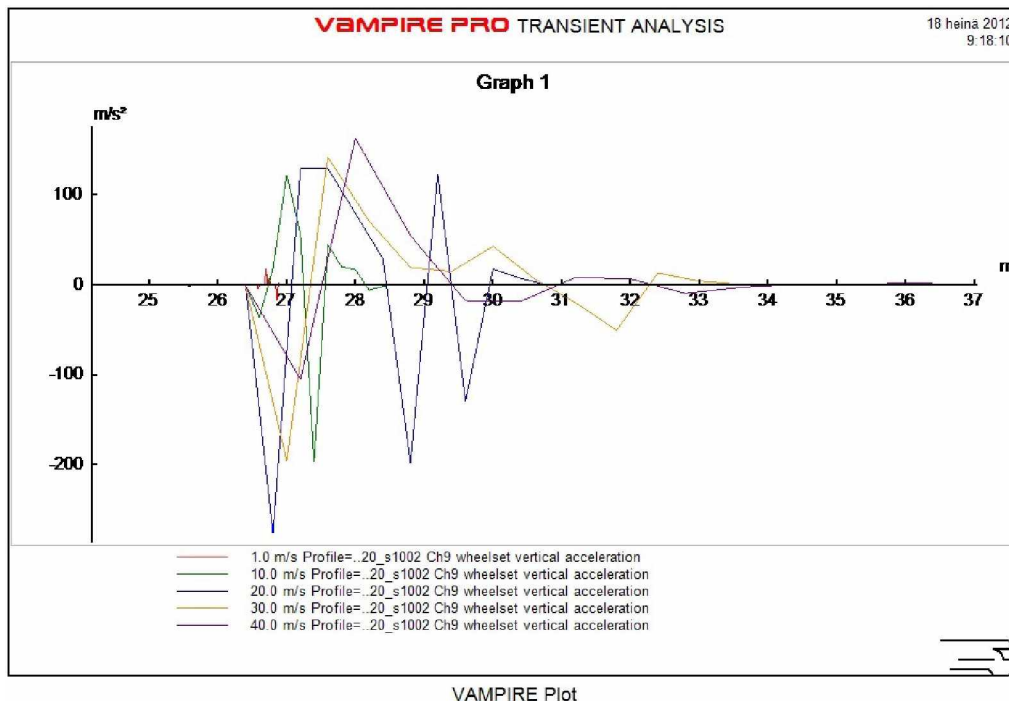
Kuva 6.29. Kiskopomppun aiheuttamat kiihtyvyydet matkustajavaunun pyöräkerrassa nopeudella 140 km/h.

Kuvasta 6.29 huomataan, että pyöräkerran pystykihtyvyys on selvästi suurempi kuin poikittaiskihtyvyys tai radansuuntainen kiihtyvyys. Pyöräkerran pystysuuntaisen kiihtyvyyden arvo on $157,6 \text{ m/s}^2$ eli noin $16,1 \text{ g}$. Telissä suurin kiihtyvyys on myös pystysuunnassa ja sen arvo on $144,8 \text{ m/s}^2$ eli noin $14,8 \text{ g}$. Vaunussa suurin kiihtyvyys on radansuunnassa $1,9 \text{ m/s}^2$ eli noin $0,2 \text{ g}$. Telin ja vaunun kiihtyvyydet ovat jo melko lähellä vaihteissa saatuja kiihtyvyyksiä, joten kiskopomppun suhteen on testattu vielä pienempää ajonopeutta.

Seuraavaksi testattiin nopeutta 20 m/s eli 72 km/h. Pyöräkerran suurimmaksi kiihtyvyyssamplitudiksi pystysuunnassa saatiin tällöin $276,3 \text{ m/s}^2$ eli noin 28,2 g. Telin suurin kiihtyvyys oli pystysuunnassa $81,0 \text{ m/s}^2$ eli noin 8,26 g. Vaunun suurimmaksi kiihtyvyydeksi saatiin pystysuunnassa $1,52 \text{ m/s}^2$ eli noin 0,15 g.

Kun nopeudeksi valittiin 1 m/s eli 3,6 km/h, pyöräkerran kiihtyvyyden suurimmaksi arvoksi saatiin pystysuunnassa $17,5 \text{ m/s}^2$ eli noin 1,8 g. Telin kiihtyvyyden suurin arvo oli pystysuunnassa $7,1 \text{ m/s}^2$ eli noin 0,7 g. Vaunun kiihtyvyyden suurimmaksi arvoksi saatiin pystysuunnassa $0,54 \text{ m/s}^2$ eli noin 0,05 g.

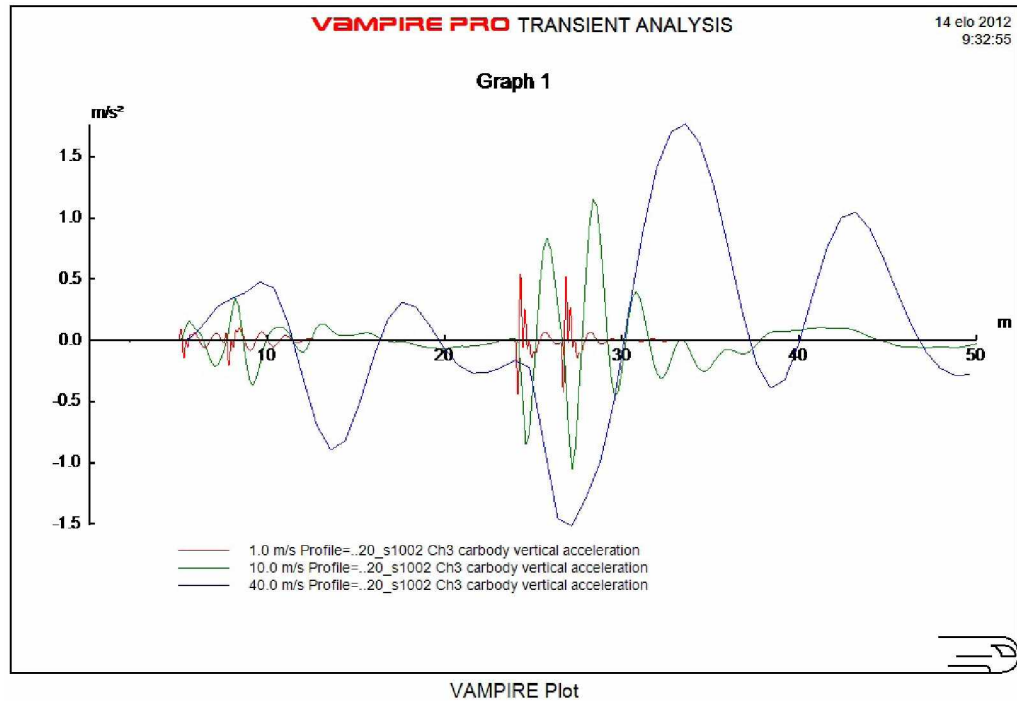
Suurimmat värähtelyt tapahtuivat lähes poikkeuksetta pystysuunnassa, joten myös kiskopompun osalta tarkastellaan tästä eteenpäin vain pystysuuntaisia kiihtyvyyksiä. Kuvassa 6.30 on esitetty pyöräkerran pystykiihtyvyydet nopeuksilla 1 m/s, 10 m/s, 20 m/s, 30 m/s ja 40 m/s.



Kuva 6.30. Kiskopompun aiheuttamat matkustajavaunun pyöräkerran pystykiihtyvyydet nopeuksilla 1 m/s, 10 m/s, 20 m/s, 30 m/s ja 40 m/s.

Pyöräkerran värähtelyissä tapahtuu selviä muutoksia vasta anturoidun pyöräkerran ylittäessä pumpun noin 26,6 metrin kohdalla. Kuvasta 6.30 huomataan, että pyöräkerran pystykiihtyvyyssamplitudit pysyvät suuremmilla nopeuksilla melko samoina. Suurin pystykiihtyvyyden arvo on $276,3 \text{ m/s}^2$ eli noin 28,2 g. Värähtelyn aallonpituus kuitenkin kasvaa selvästi nopeuden kasvaessa. Lisäksi nopeuden kasvaessa värähtely vaimenee hitaammin.

Seuraavaksi katsottiin vielä, miten erilaiset ajonopeudet vaikuttavat matkustajavaunun rungon värähtelyihin. Kuvassa 6.31 on esitetty vaunun pystykiihtyvyydet nopeuksilla 1 m/s, 10 m/s ja 40 m/s. Osa aiemmin käytetyistä nopeuksista on jätetty kuvasta pois kuvaajan selkeyttämiseksi.



Kuva 6.31. Kiskopompun aiheuttamat matkustajavaunun vaunurungon pystykihtyvyydet nopeuksilla 1 m/s, 10 m/s ja 40 m/s.

Vaunun kiihtyvyyksissä havaitaan muutoksia jo viiden metrin kohdalla, jolloin ensimmäinen pyöräkerta ylittää pumpun. Suurimmat kiihtyvyydet saadaan kuitenkin vasta viimeisen pyöräkerran ylittäessä pumpun noin 26,6 metrin kohdalla, sillä vaunun anturointi on takimmaisen pyöräkerran kohdalla. Kun nopeus on hyvin alhainen, kuten kuvan 6.31 tapauksessa 1 m/s, havaitaan kiihtyvyysskuvaajasta selvästi jokaisen neljän pyöräkerran ylityskohta pumpulle. Suuremmilla nopeuksilla eri pyöräkertojen aiheuttamia värähtelyitä on vaikea erottaa toisistaan, sillä värähtelyamplitudi on suurempi ja värähtely jatkuu pidempään. Suurin pystykihtyvyyden arvo matkustajavaunussa on 2,32 m/s² eli noin 0,24 g. Tarkemmat kiihtyvyyssarvot on esitetty taulukossa 6.11.

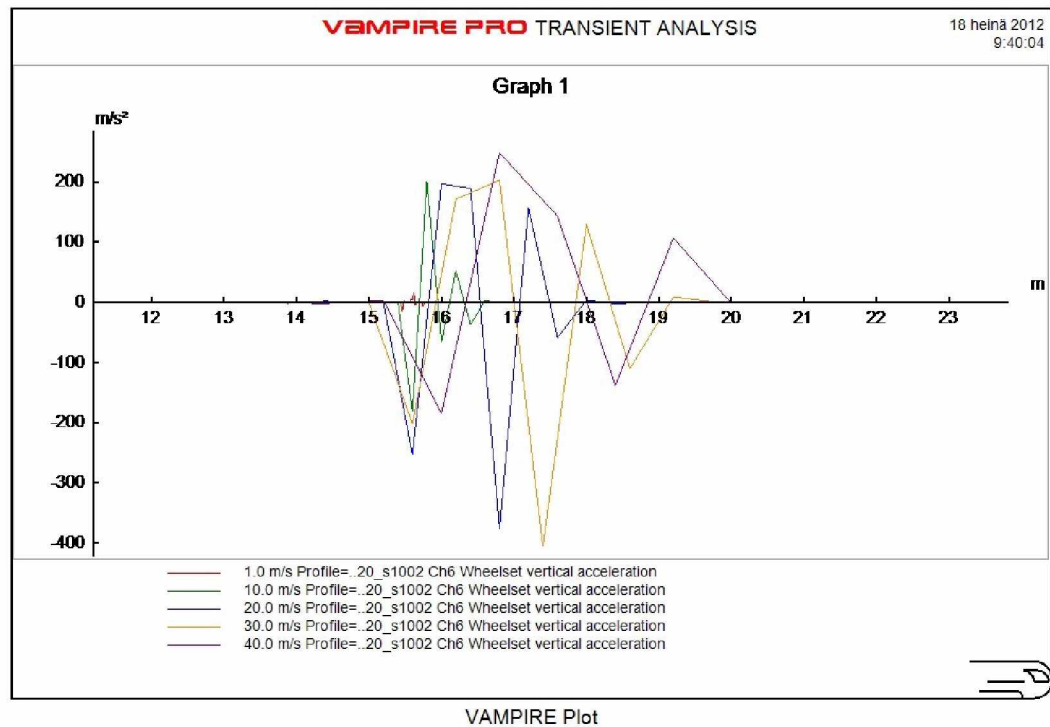
Taulukko 6.11.

Matkustajavaunun pyöräkerran, telin ja vaunun pystykiihtyvyyden maksimiarvot kiskopompun kohdalla.

Nopeus (m/s)	Pystykiihtyvyyden maksimiarvo pyöräkerrassa		Pystykiihtyvyyden maksimiarvo telissä		Pystykiihtyvyyden maksimiarvo vaunussa	
	(m/s ²)	(g)	(m/s ²)	(g)	(m/s ²)	(g)
1	17,5	1,8	7,1	0,7	0,54	0,05
10	196,6	20,0	84,6	8,6	1,15	0,12
20	276,3	28,2	81,0	8,3	1,52	0,16
30	195,7	19,9	121,0	12,3	2,32	0,24
40	162,5	16,6	141,3	14,4	1,77	0,18

Taulukosta nähdään, että muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta kiskopompun aiheuttamat värähtelyt kasvavat nopeuden kasvaessa. Kiihtyvyyssamplitudien kasvu ei kuitenkaan ole suoraan verrannollinen nopeuden kasvuun.

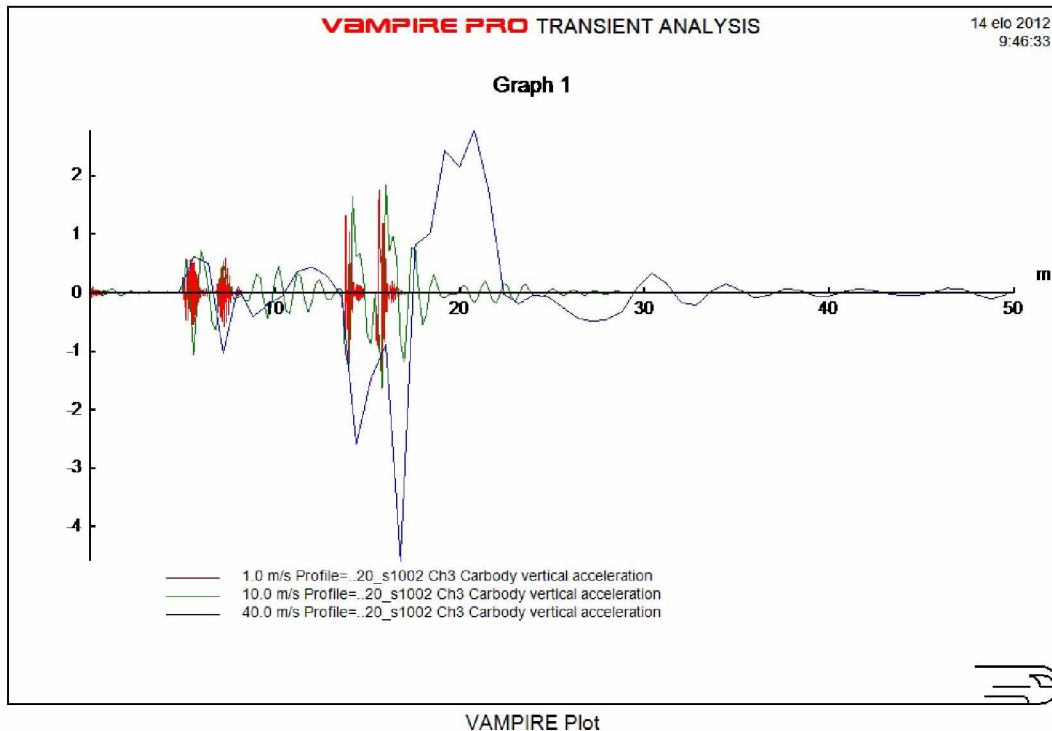
Seuraavaksi tarkasteltiin kiskopompun aiheuttamia kiihtyvyyksiä Vok-vaunulle, jota on käytetty tavaravaunun esimerkkinä. Kiskopomppu on jälleen sijoitettu radalla viiden metrin kohdalle. Tavaravaunu on lyhyempi kuin matkustajavaunu, joten anturoitu pyöräkerta kulkee pompusta aiemmin. Anturit on sijoitettu jälleen taaimpaan pyöräkertaan, eli anturoitu pyöräkerta kulkee kiskopompusta noin 15,5 metrin kohdalla. Kuvassa 6.32 on esitetty pyöräkerran pystykiihtyvyydet tavaravaunulle nopeuksilla 1 m/s, 10 m/s, 20 m/s, 30 m/s ja 40 m/s.



Kuva 6.32. Kiskopompun aiheuttamat tavaravaunun pyöräkerran pystykiihtyvyydet nopeuksilla 1 m/s, 10 m/s, 20 m/s, 30 m/s ja 40 m/s.

Myös tavaravaunulla värähtelyn aallonpituus kasvaa ja värähtely vaimenee hitaammin nopeuden kasvaessa. Nopeus ei kuitenkaan suuremmilla nopeuksilla vaikuta värähtelyn amplitudiin. Suurin pystykiihtyvyyden arvo on 405 m/s^2 eli noin $41,3 \text{ g}$. Tämä on selvästi suurempi kuin vastaava arvo matkustajavaunulle.

Tavaravaunun tapauksessa tarkasteltiin vielä vaunurunkoon kohdistuvia kiihtyvyyksiä eri nopeuksilla. Kuvassa 6.33 on tavaravaunun pystykiihtyvyydet nopeuksilla 1 m/s, 10 m/s ja 40 m/s. Osa pyöräkerran kuvaajassa käytetyistä nopeuksista on jätetty pois kuvaajan selkeyttämiseksi.



Kuva 6.33. Kiskopompun aiheuttamat tavaravaunun vaunurungon pystykiihtyvyydet nopeuksilla 1 m/s, 10 m/s ja 40 m/s.

Vaunun kiihtyvyyksissä huomataan jälleen muutoksia jo viiden metrin kohdalla, kun ensimmäinen pyöräkerta ylittää pumpun. Suurimmat muutokset tapahtuvat anturoidun pyöräkerran ylittäessä pumpun noin 15,5 metrin kohdalla. Tavaravaunussa suurin pystykiihtyvyyden arvo on $4,8 \text{ m/s}^2$ eli noin $0,49 \text{ g}$. Tämä on noin kaksinkertainen verrattuna vastaavaan matkustajavaunun arvoon. Tarkemmat pystykiihtyvyyksien arvot löytyvät taulukosta 6.12. Arvoista huomataan, että muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta kiskopompun aiheuttamat värähtelyt kasvavat jälleen nopeuden kasvaessa.

Taulukko 6.12.

Tavaravaunun pyöräkerran ja vaunun pystykiihtyvyyden maksimiarvot kiskopompun kohdalla.

Nopeus (m/s)	Pystykiihtyvyyden maksimiarvo pyöräkerrassa		Pystykiihtyvyyden maksimiarvo vaunussa	
	(m/s ²)	(g)	(m/s ²)	(g)
1	16,2	1,7	1,74	0,18
10	201,4	20,5	1,83	0,19
20	376,1	38,4	3,82	0,39
30	405,0	41,3	4,79	0,49
40	249,0	25,4	4,59	0,47

Vaunutyyppillä on merkittävä vaikutus erilaisten epäjatkuvuuskohtien aiheuttamaan värähtelyyn vaunussa. Sekä kiskoatkoksen että kiskopompun tapauksessa tavaravaunuun kohdistuvat maksimikiihtyvyyssamplitudit ovat suuremmat kuin matkustajavaunun tapauksessa. Tavaravaunun värähtelyamplitudit ovat yleensä noin 1–4-kertaisia matkustajavaunun värähtelyihin verrattuna. Mittausvaunu poikkeaa jousitus- ja massaominaisuuksiltaan hieman sekä matkustajavaunun esimerkkinä käytetystä Ex-vaunusta että tavaravaunun esimerkkinä käytetystä Vok-vaunusta. Tämän vuoksi laskuissa saatuja kiihtyvyyssarvoja ei voi suoraan verrata mittauksissa saatuihin kiihtyvyyssarvoihin. Mittausvaunun jousitusominaisuudet saatiin kuitenkin selville aivan työn loppuvaiheessa, ja näiden tietojen perusteella laskelmat tehtiin myös mittausvaunulle. Mittausvaunun kiihtyvyyssarvot sijoittuvat samalle tasolle kuin esimerkeinä käytettyjen matkustaja- ja tavaravaunujen kiihtyvyyssarvot.

Mallinnuksessa saatujen kiihtyvyytkuvaajien mukaan tasaisella rataosuudella sekä matkustaja- että tavaravaunun kiihtyvyydet ovat hyvin pieniä. Ennen kiskon epäjatkuvuuskohtien ylittämistä pystykiihtyvyydet olivat pyöräkerrassa korkeintaan 0,001 m/s² eli noin 0,0001 g. Mittauksissa pyöräkerran pystykiihtyvyydet olivat samalla nopeudella (140 km/h) tasaisella rataosuudella noin 10–15 g. Todellisuudessa kiihtyvyydet voivat siis etenkin suoralla ja tasaisella rataosuudella olla selvästi suurempia kuin mallissa. Mallinnuksessa on kyseessä ideaalitilanne, eikä siinä ole otettu huomioon kiskon lisäksi mitään muita vaunuun vaikuttavia ulkoisia voimia.

Laskuissa käytetyt epäjatkuvuuskohdat olivat hyvin erityyppisiä. Kiskoatkoksen tapauksessa pystysuuntainen poikkeama suuntautuu kiskosta alaspäin ja kiskopompun tapauksessa ylöspäin. Lisäksi kiskoatkoksen tapauksessa poikkeaman pituus oli vain 21 mm, kun kiskopompun tapauksessa poikkeama oli selvästi pidempi, 285 mm. Kiskoatkoksessa vaunut eivät suuremmilla nopeuksilla selvästi ehtineet reagoimaan epäjatkuvuuskohtaan ja siksi värähtely jäi melko pieneksi. Kiskopomppuun vaunut reagoivat kaikilla testatuilla nopeuksilla. Laskujen perusteella voidaan olettaa, että lyhyen epäjatkuvuuskohdan tapauksessa ylöspäin suuntautuva kiskon pystysuuntai-

nen poikkeama vaikuttaa junan värähtelyihin enemmän kuin alaspäin suuntautuva poikkeama. Epäjatkuvuuskohtia pitäisi kuitenkin testata useita erimittaisia, jotta asialle saataisiin varmuus. Vaihteita vastaavat kiihtyvyyssamplitudit saavutetaan kuitenkin todennäköisesti helpommin kiskoon kiinnitetyn kiskopompun kuin kiskojohtoksen tai kiskoon tehdyn loven avulla.

6.4 Pohdinta epäjatkuvuuskohtien vaikutuksista

Työssä oli tarkoituksena tarkastella erilaisten raiteen epäjatkuvuuskohtien aiheuttamia kiihtyvyyksiä yli kulkevissa junissa. Näiden kiihtyvyyksien avulla voidaan päätellä, mitkä epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat todennäköisimmin vaunuun kertyneen lumen irtoamisen. Epäjatkuvuuskohdan aiheuttaman herätteen suuruus riippuu junan massa- ja jousitusominaisuuksista sekä junan nopeudesta. Lumen irtoamiseen vaikuttaa värähtelyn lisäksi se, kuinka lujasti lumi on kiinnittynyt junan runkoon.

6.4.1 Epäjatkuvuuskohtien aiheuttamat kiihtyvyydet

Junaan kohdistuvia kiihtyvyyksiä on tutkittu mittaamalla kahdessa erityyppisessä vaihteessa sekä tasoristeysten ja siltojen kohdilla. Lisäksi laskennallisesti on tutkittu kiskojohtoskohdan ja kiskopompun aiheuttamia kiihtyvyyksiä. Mittaukset on tehty mittaavaunulla A17 ja laskennalliset tulokset on saatu sekä matkustajavaunulle (Exvaunu) että tavaravaunulle (Vok-vaunu). Tuloksia ei voida suoraan verrata keskenään, sillä eri vaunutyypin massa- ja jousitusominaisuudet eroavat toisistaan. Mittausvaunun värähtelyt sijoittuvat kuitenkin suunnilleen samalle tasolle kuin matkustaja- ja tavaravaunujen värähtelyt.

Mittaustuloksista saatiin selville, että yleisesti ottaen vaihteet aiheuttavat junaan suurimmat kiihtyvyyssarvot. Vaihteen aiheuttamat kiihtyvyydet junan eri osissa ovat noin 4–10-kertaiset verrattuna suoran jatkuvan rataosuuden aiheuttamiin kiihtyvyyksiin, eli mittaavaunun tapauksessa esimerkiksi vaunurungon maksimipystykiihtyvyydet olivat vaihteessa noin 0,1g–0,5g. Vaihteen aiheuttama värähtely riippuu siitä, mitä nopeutta vaihteeseen ajetaan. Suuremmilla nopeuksilla vaihde aiheuttaa junaan suuremmat maksimikiihtyvyyssarvot.

Tasoristeysten aiheuttamat kiihtyvyydet ovat mittaustulosten perusteella noin 1–10-kertaiset radan normaaliin kiihtyvyydestään verrattuna, eli keskimäärin tasoristeykset aiheuttavat vaunuun hieman pienempiä maksimikiihtyvyyksiä kuin vaihteet. Siltojen aiheuttamat maksimikiihtyvyydet olivat tässä mittauksessa 1–4-kertaiset radan normaaliin kiihtyvyydestään verrattuna, eli sillat aiheuttavat tämän mittauksen perusteella keskimäärin pienempiä maksimivärähtelyitä kuin vaihteet tai tasoristeykset.

Laskentatuloksista käy ilmi kiskojohtoskohdan ja kiskopompun väliset erot. Molemmat toimivat herätteenä vaunun värähtelylle, mutta kiskopomppu aiheuttaa selvästi suuremmat maksimikiihtyvyydet vaunuun. Kiskopompun tapauksessa junan nopeuden kasvaessa värähtelyamplitudi kasvaa tai amplitudin pysyessä ennallaan värähtelyn aallonpituus kasvaa. Lisäksi nopeuden kasvaessa värähtely vaimenee hitaammin. Matkustajavaunun tapauksessa kiskopompun aiheuttama vaunurungon pystykiihtyvyyden maksimiarvo on 2,32 m/s² eli noin 0,24 g. Tavaravaunun tapauksessa kiskopompun aiheuttama vaunurungon pystykiihtyvyyden maksimiarvo on 4,80 m/s² eli noin 0,49 g. Molemmat arvot on saatu nopeudella 30 m/s ja sijoittuvat samaan luok-

kaan kuin vaihteiden aiheuttamat vaunurungon pystykihtiyyden maksimiarvot mitausvaunulle.

Kisko jatkoksen tapauksessa maksimivärähtelyamplitudi pienenee selvästi nopeuden kasvaessa. Matkustajavaunun tapauksessa vaunurungon pystykihtiyyden maksimiarvo on $0,31 \text{ m/s}^2$ eli noin $0,03 \text{ g}$. Tavaravaunun tapauksessa vaunurungon pystykihtiyyden maksimiarvo on $0,86 \text{ m/s}^2$ eli noin $0,09 \text{ g}$. Molemmat arvot on saatu nopeudella 1 m/s , ja suuremmilla nopeuksilla arvot ovat vielä selvästi pienempiä. Nämä arvot ovat sekä matkustaja- että tavaravaunun tapauksessa pienempiä kuin vaihteiden aiheuttamat vaunurungon pystykihtiyyden maksimiarvot mitausvaunulle.

Laskentatulosten suhteen täytyy huomioida, että mallinnuksessa on kyse kiskon ja vaunun idealisoinnista. Todellisessa tilanteessa kiskossa tai pyörässä voi olla epätasaisuuksia ja vikoja, eivätkä niiden profiilit siten aina vastaa ideaaliprofiileja. Vaunuun vaikuttaa todellisuudessa aina myös asioita, joita mallissa ei ole huomioitu. Näitä ovat esimerkiksi tuuli ja vaunun epätasaisesti jakautunut massa. Lisäksi mallinnuksessa on ollut mukana vain yksi junavaunu. Todellisessa värähtelysystemissä on mukana useita vaunuja, ja niiden värähtelykäyttäytyminen on kytketty toisiinsa. Tämän vuoksi voidaan turvallisesti verrata ainoastaan mallinnuksessa saatuja kiihtyvyyssarvoja keskenään ja toisaalta mittauksessa saatuja kiihtyvyyssarvoja keskenään. Mallinnuksen avulla on kuitenkin mahdollista tarkastella myös monimutkaisempia värähtelysystemejä, jolloin tuloksista saadaan tarkempia.

6.4.2 Lumen irtoaminen junakalustosta

Tässä työssä kiihtyvyyksiä on tarkasteltu maksimikihtiyyssamplitudien avulla. Oletuksena laskuissa on siis ollut, että yksi suuri kiihtyvyyden arvo aiheuttaisi lumen irtoamisen. Todellisuudessa myös värähtelyn taajuudella ja kestolla on merkitystä lumen irtoamiseen. Mikäli epäjatkuvuuskohta herättää vaunun ominaisvärähtelyn, lumen irtoamiseen ei välttämättä tarvita yksittäistä suurta kiihtyvyyssamplitudia. Pitkäkestoisen värähtelyn vaikutusta lumen irtoamiseen ei ole tämän työn puitteissa tarkasteltu lainkaan.

Luvussa 3.2 tarkasteltiin lumen ja jään irtoamista junasta yhtälön avulla. Siinä lumen ja jään irrottamiseen tarvittavalle kiihtyvyydelle saatiin kaavaksi

$$a = \frac{\tau_a A - mg}{m} \quad (6.1)$$

missä

τ_a on lumen tai jään adhesiivinen leikkauslujuus

A on ala, jolla lumimassa on kiinnittynyt junavaunuun

m on lumen massa

a on lumimassaan kohdistuva kiihtyvyys

Kaavasta 6.1 nähdään, että mahdollisimman painava ja pieneltä pinta-alalta junassa kiinni oleva lumimassa vaatii pienimmän kiihtyvyyden irrotakseen. Toisaalta lumen adheesiolujuus riippuu lumen tiheydestä, jolloin raskaampi lumimassa voikin olla tiukemmin kiinnittynyt junan alustaan. Siksi on vaikea sanoa, irtoaako junasta helpommin raskas vai kevyt lumimassa. Oleellista tarkasteluissa on kuitenkin se pinta-ala, jolla lumimassa on kiinnittynyt junan alustaan. Lumen irrottamiseksi tarvittava kiihtyvyys on lähes suoraan verrannollinen alaan, jolla lumimassa on kiinnittynyt junan alustaan. Tämä verrannollisuus pätee, kun $a \gg g$.

Lumen ja jään erottelu toisistaan on vaikeaa, ja siksi tarkasteluissa on puhuttu usein yksinkertaisesti vain lumesta. Lumella on kuitenkin kaikissa tilanteissa tarkoitettu lumen lisäksi myös lumijäätä ja jäätä. Junaan kertynyt aine on yleensä lunta, mutta se voi muuttua lämpötila- tai painemuutosten johdosta jääksi. Siksi tarkasteluissa täytyy huomioida, että junan alustasta voi irrota lumen lisäksi myös lumijäätä tai jäätä.

Taulukossa 6.13 on tarkasteltu esimerkkinä useampia tapauksia, joissa lumen massaa, adhesiivista leikkauslujuutta ja kiinnittymispinta-alaa vaihdellaan. Taulukossa on kerrottu kaavalla 6.1 saatu kiihtyvyyden arvo kahdessa eri yksikössä. Taulukon neljä ensimmäistä riviä kuvaavat $0,1 \times 0,1 \times 0,1 \text{ m}$ -kokoisen lumimassan irtoamiseen tarvittavia kiihtyvyyksiä eri adheesiolujuuksille. Lumen tiheytenä on käytetty tässä tapauksessa jään tiheyttä eli $\rho = 917 \text{ kg/m}^3$. Myös adheesiolujuuden arvot on valittu jään tai lumijään adheesiolujuuksien joukosta. Taulukon alimmilla riveillä adheesiolujuuden arvo on pidetty vakiona, mutta muita arvoja on muutettu.

Taulukko 6.13.

Lumen irtoamiseen vaadittava kiihtyvyyden arvo eri muuttujien arvoilla.

σ_a (MPa)	A (m ²)	m (kg)	a (m/s ²)	a (g)
0,02	0,01	0,9	208	21
0,1	0,01	0,9	1081	110
0,4	0,01	0,9	4352	444
0,7	0,01	0,9	7624	777
0,4	0,05	0,9	21800	2223
0,4	0,05	5	3990	407
0,4	0,05	10	1990	203
0,4	0,5	10	19990	2038
0,4	0,5	15	13324	1359

Lumen irrottamiseen vaadittaisiin kiinnittyneen lumimassan ominaisuuksista riippuen noin 20–2000 g:n kiihtyvyyksiä. Suurin mittauksissa ja laskuissa saatu kiihtyvyyden arvo on pyöräkerralle saatu pystykiihtyvyys 280 g. Tällainen kiihtyvyyden arvo riittäisi useissa tapauksissa lumen irtoamiseen. Eniten lunta kertyy kuitenkin teliin ja vaunurunkoon, ja suurin mittauksissa saatu kiihtyvyyden arvo on telille 46 g ja vaunurungolle vain 0,8 g. Pelkkä raiteen epäjatkuvuuskohtien aiheuttama yksittäinen kiihtyvyyshuippu ei siis kaavan 6.1 perusteella riitä irrottamaan lunta vaunurungosta, ellei lumi ole kiinnittynyt rakenteeseen erittäin heikosti. Raiteen epäjatkuvuuskohta voi kuitenkin aiheuttaa junarunkoon taipumia, jotka saattavat johtaa lumen murtumiseen. Tällöin pienemmilläkin kiihtyvyyden arvoilla lumi voi irrota vaunusta. Lumen ja jään murtamiseen vaadittavista taipumista kerrottiin aiemmin luvussa 3.2.

Käytännössä lumen irrottamiseen ei kuitenkaan tarvita niin suurta kiihtyvyyttä kuin kaavan 6.1 avulla on laskettu. Kuten luvussa 2 aiemmin todettiin, adheesio irtaoo progressiivisesti alkaen eniten rasitetusta kohdasta ilman, että täysi adheesiolujuus vaikuttaisi koko kosketuspinnalla samanaikaisesti (Holtttinen et al. 1998).

7 Yhteenveto ja jatkotutkimusehdotukset

Tässä tutkimuksessa oli tavoitteena selvittää raiteen epäjatkuvuuskohtien ja junakalustoon kiinnittyneen lumen irtoamisen välistä yhteyttä. Lumi kiinnittyy junakalustoon adheesiovoimilla, jotka riippuvat merkittävästi esimerkiksi lumen rakenteesta ja ulkoilman lämpötilasta. Tämän vuoksi adheesiolujuudelle ei voida antaa tiettyä vakioarvoa, vaan adheesiolujuus täytyy päätellä tapauskohtaisesti. Kun lämpötila on tarpeeksi lähellä lumen sulamispistettä, lumi voi irrota junakalustosta adhesiivisesti lumen ja teräksen liitoskohdasta. Lämpötilan ollessa selvästi pakkasen puolella, murtuminen tapahtuu todennäköisesti lumen sisällä, jolloin lumen sisäiset koheesiosidokset katkeavat.

Työssä tarkasteltiin lumen irtoamista kahdessa ongelmalliseksi todetussa vaihteessa. Näissä mittauksissa saatiin selville, että lumen irtoaminen riippuu selvästi ulkoilman lämpötilasta. Eniten lunta irtosi lämpötilan ollessa 0 °C:n tuntumassa tai hieman sen alapuolella. Mittauksissa ilmeni myös yhteys junasta irronneen lumen määrän ja junan nopeuden välille. Keravan vaihteen tapauksessa junan nopeuden yhteys irronneen lumen määrään oli erittäin selvä: junan nopeuden kasvaessa lunta irtosi junasta enemmän. Madesjärven vaihteessa sen sijaan yhteys ei ollut aivan yhtä ilmeinen. Kiskon epäjatkuvuuskohdan aiheuttamien iskuvoimien on kuvattu olevan suoraan verrannollisia junan nopeuteen. Siksi myös vaihteen junaan aiheuttama herätevaikutus on suurempi junan nopeuden kasvaessa. Herätevaikutuksen kasvaessa lumen irtoaminen junakalustosta on todennäköisempää.

Samalla tarkasteltiin matkustaja- ja tavarajunien eroja junakalustoihin kertyneen lumen irtoamisessa. Tässä tutkimuksessa eroa matkustaja- ja tavarajunien välillä ei juuri havaittu, mutta erityyppisiin junakalustoihin kertyneen lumen irtoamista voitaisiin jatkossa tutkia vielä tarkemmin.

Työssä tutkittiin myös junan värähtelykäyttäytymistä Helsinki–Joensuu-välisellä rataosuudella. Vaunun pyöräkertaan, teliin ja vaunurunkoon asennettujen kiihtyvyyssantureiden avulla saatiin selville junan kiihtyvyydet erilaisissa radan epäjatkuvuuskohdissa. Mittaustuloksista tutkittiin erityisesti kahden eri vaihdetyypin aiheuttamia kiihtyvyyksiä. Näiden perusteella selvisi, että vaihteen epäjatkuvuuskohdan herätteen aiheuttamat kiihtyvyydet junakalustossa riippuvat merkittävästi junan nopeudesta. Vaihteen aiheuttamat kiihtyvyydet junan pyöräkerrassa, telissä ja vaunurungossa kasvavat junan nopeuden kasvaessa. Työssä tarkasteltiin vaihteiden lisäksi myös tasoristeysten ja siltojen epäjatkuvuuskohtien aiheuttamia kiihtyvyyksiä junakalustossa. Keskimääräisesti näistä kolmesta erityyppisestä epäjatkuvuuskohdasta vaihteet aiheuttivat junakalustoon suurimmat maksimikiihtyvyyssamplitudit. Voidaan siis sanoa vaihteiden olevan merkittävä värähtelyiden aiheuttaja junakalustossa. Jos junakalustoon kertynyt lumi siis irtoaa nimenomaan kiskon epäjatkuvuuskohdan aiheuttaman herätteen vaikutuksesta, on todennäköistä, että lumi irtoaa juuri vaihteen kohdalla.

Työssä saatiin samalla kuva junan yleisestä värähtelykäyttäytymisestä. Junan värähtelyt olivat samaa tasoa kaikilla rataosuuksilla Helsinki–Lappeenranta-välillä, mutta Lappeenranta–Joensuu-välillä värähtelytaso oli hieman suurempi. Erityisesti Parikkala–Joensuu-välillä keskimääräiset kiihtyvyydet olivat hieman suurempia kuin muilla rataosuuksilla. Nämä yleiseen värähtelykäyttäytymiseen liittyvät huomiot ovat kui-

tenkin vain arvioita, ja jatkossa junakaluston värähtelykäyttäytymistä voitaisiin tutkia ja analysoida tarkemmin.

Työssä mitattujen kiihtyvyystietojen analysoinnissa päästiin tämän työn puitteissa vasta alkuun. Mitattuja kiihtyvyyksiä kannattaakin analysoida jatkossa yksityiskohtaisemmin. Tässä työssä kiihtyvyyksiä tarkasteltiin vain maksimikiihtyvyyssamplitudien avulla, ja jatkossa kiihtyvyydatasta voitaisiin analysoida myös taajuuksia. Työssä mitattujen kiihtyvyyksien avulla on mahdollista saada tietoa myös esimerkiksi junakaluston värähtelykäyttäytymisestä radan kaarteissa. Lisäksi työssä käytetyillä mittausjärjestelyillä (luku 5.3) on mahdollista saada selville junakalustoon kertyneen lumen irtoamisen ja junakaluston kiihtyvyyksien välinen yhteys.

Laskelmien avulla käytiin läpi vielä kiskoatkoksen ja kiskopomppun aiheuttamia kiihtyvyyksiä matkustaja- ja tavaravaunussa. Lyhyen kiskosta alaspäin suuntautuvan epäjatkuvuuskohdan, kiskoatkoksen, ei todettu aiheuttavan juuri suoran rataosuuden värähtelytasosta poikkeavia värähtelyitä junakalustoon. Laskuissa havaittiin, että kiskoatkoksen aiheuttama herätevaikutus ei kasva junan nopeuden kasvaessa. Kiskon epäjatkuvuuskohdan aiheuttamat iskuvoimat eivät siis tässä tapauksessa ole suoraan verrannollisia junan nopeuteen. Tämä voi johtua kiskoatkoskohdan pituudesta: epäjatkuvuuskohta on niin lyhyt, ettei juna ehdi reagoimaan siihen suuremmilla nopeuksilla juuri lainkaan. Hieman pidempi kiskosta ylöspäin suuntautuva epäjatkuvuuskohta, kiskopomppu, voi sen sijaan aiheuttaa junakalustoon vastaavia kiihtyvyyksiä kuin vaihteet.

Tavaravaunun maksimikiihtyvyyssamplitudit olivat lähes poikkeuksetta suurempia kuin matkustajavaunulla. Dynamiikkaohjelmalla selvitettiin vielä matkustaja- ja tavaravaunun ominaistajuuudet ja niitä vastaavat värähtelymuodot, joita voidaan myöhemmin hyödyntää junien värähtelykäyttäytymisen tutkimisessa. Ominaisuuksien avulla on mahdollista hyödyntää esimerkiksi resonanssi-ilmiötä lumen irrottamiseksi junakalustosta. Lisäksi dynamiikkaohjelmalla voidaan jatkossa tarkastella esimerkiksi epätasaisen kiskon vaikutusta junakaluston värähtelyihin.

Tutkimuksissa saatiin selville erilaisten epäjatkuvuuskohtien aiheuttamat maksimikiihtyvyyssamplitudit junakalustossa. Mittauksissa ja laskuissa saatuja arvoja ei voi kuitenkaan suoraan verrata keskenään, sillä mittausvaunun massa- ja jousitusominaisuudet poikkeavat laskuissa käytettyjen tavara- ja matkustajavaunujen ominaisuuksista. Voidaan kuitenkin sanoa, että vaihteet aiheuttavat selviä normaalitasosta poikkeavia värähtelyitä junakalustossa, ja kiskopomppun avulla on mahdollista saavuttaa vastaava värähtelytaso.

Junakaluston kiihtyvyyksien ja junakalustoon kertyneen lumen ja jään irtoamisen välistä yhteyttä tarkasteltiin yksinkertaistettujen laskujen avulla. Näiden avulla selvisi, ettei kiihtyvyys voi yleensä yksinään aiheuttaa lumen ja jään irtoamista junakalustosta. Lumen ja jään irtoamiseksi vaadittava kiihtyvyys on usein selvästi suurempi kuin mittauksissa saadut maksimikiihtyvyydet. Lunta kertyy eniten teliin ja vaunurunkoon, ja etenkin vaunurungossa kiihtyvyydet ovat hyvin pieniä. Vaunurungon kiihtyvyydet eivät riitä lumen irtoamiseen, ellei lumi ole erityisen heikosti kiinnittynyt rakenteeseen. Lumi tai jää voi kuitenkin irrota junakalustosta taipumien seurauksena, sillä jo pienetkin taipumat junakalustossa riittävät aiheuttamaan lumen tai jään murtumisen. Murtumisen seurauksena lumi tai jää voi irrota pienilläkin kiihtyvyyksisarvoilla.

Näiden tulosten suhteen on hyvä muistaa, että etenkin lumi voi olla kiinnittynyt rakenteeseen myös hyvin pienillä voimilla. Tällöin pienikin värähtely riittää lumen ir-

toamiseen. Yhtä lailla lumi voi olla kiinnittynyt myös niin suurilla voimilla, että mikään mitattu kiihtyvyyssarvo ei saa lunta irtoamaan. Myös jään ja teräksen väliset kiinnittymisvoimat vaihtelevat melko paljon, ja yleisesti ottaen jää on kiinnittynyt rakenteeseen aina lujemmin kuin lumi. Junakalustoon kiinnittyneen lumen ja jään irtoamisen ja raiteen epäjatkuvuuskohtien välistä yhteyttä pitäisi tutkia vielä työssä esitetyn suunnitelman mukaisesti käytännössä, jotta saataisiin tarkempaa tietoa siitä, millaiset kiihtyvyydet riittävät lumen ja jään irtoamiseen.

Lähteet

- Alstom. 2011. Alstom ja VR uudistavat Pendolino-junia. 19.8.2011. [WWW] [Viitattu 11.4.2012] Saatavilla: <http://www.alstom.com/press-centre/fi/2011/8/alstom-ja-vr-uudistavat-Pendolino-junia/>.
- Andrews, E.H. & Lockington, N.A. 1983. The cohesive and adhesive strength of ice. *Journal of Materials Science*, 18 (1983), pp. 1455–1465.
- Andrews, E.H., Majid, H.A. & Lockington, N.A. 1984. Adhesion of ice to a flexible substrate. *Journal of Materials Science*, 19, pp. 73–81.
- Buckley, D.H. 1981. Surface effects in adhesion, friction, wear and lubrication. Elsevier Scientific Publishing Company. 631 p.
- Colbeck, S.C. 1980. Dynamics of snow and ice masses. New York, Academic Press. 468 p.
- Fish, A.M. & Zaretsky, Y.K. 1997. Ice strength as a function of hydrostatic pressure and temperature. US Army Corps of Engineers, CRREL Report 97-6, 10/1997. 14 p.
- Freemeteo. 2012. Tunneittainen säähistoria 23.2.2012 kohteille Helsinki, Lappeenranta ja Joensuu. [WWW] [Viitattu 17.4.2012] Saatavilla: freemeteo.com.
- Gold, L.W. Process of failure in ice. 1970. *Canadian Geotechnological Journal*, 7, pp. 405–413.
- Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: Wheel and rail interface issues. 2001. USA, International Heavy Haul Association (IHHA).
- Hakulinen, P., Korkeamäki, S. & Nurmikolu, A. 2013. Katsaus liikkuvan kaluston ja radan vuorovaikutuksen perusteisiin. Julkaistavana Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä -sarjassa. Tampere.
- Hirochi, T., Maeda, Y., Yamada, S., Shirakashi, M., Hattori, M. & Saito, A. 2004. Flow patterns of ice/water slurry in horizontal pipes. *Journal of Fluids Engineering*, vol.126, May 2004, pp. 436–441.
- Hobbs, P.V. 1974. Ice physics. Oxford, Clarendon press. 837 p.
- Holttinen, H., Liukkonen, S., Furustam, K.-J., Määttänen, M., Haapanen, E. & Holttinen, E. 1998. Offshore-tuulivoima Perämeren jääolosuhteissa. Espoo, VTT Julkaisuja 828. 118 s.
- Ilmatieteen laitos. 2012. Teematietoa. [WWW] [Viitattu 27.2.2012] Saatavilla: ilmatieteenlaitos.fi.
- Ilta-Sanomat. 2011. Jäänestosta apua junaliikenteen talvipulmiin. 4.1.2011. [WWW] [Viitattu 11.4.2012] Saatavilla: <http://www.iltasanomat.fi/kotimaa/jaanestosta-apua-junaliikenteen-talvipulmiin-/art-1288360366059.html>.

Iwnicki, S. 2003. Simulation of wheel-rail contact forces. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 26, pp. 887–900.

Janda Lab. 2008. University of California. [WWW] [Viitattu 26.7.2012] Saatavilla: <http://chem.ps.uci.edu/~kcjanda>.

Javan-Mashmool, M. 2005. Theoretical and experimental investigations for measuring interfacial bonding strength between ice and substrate. Master study. Université du Québec. 127 p.

Jellinek, H.H.G. 1958. The influence of imperfections on the strength of ice. *Proc. phys. Soc.* 71, pp. 797–814.

Jellinek, H.H.G. 1959. Adhesive properties of ice. *Journal of Colloid Science*, 14, pp. 268–280.

Jellinek, H.H.G. 1960. Adhesive properties of ice, part II. Illinois, U.S. Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment, Research report 62. 10 p.

Jellinek, H.H.G. 1962. Ice adhesion. *Can. J. Phys.* 40, pp. 1294–1309.

Jones, S.J. 1982. The confined compressive strength of polycrystalline ice. *Journal of Glaciology* 28, 98, pp. 171–177.

Junnikkala, J. & Untinen, J. 2011. Kokeilu jään poistamiseksi kiskon epäjatkuvuuskohdan avulla. Loppuraportti 18.2.–6.4.2011. Oulu. Oulun yliopisto. 10 s. + liitt. 1 s.

Kasaai, M.R. & Farzaneh, M. 2004. A critical evaluation methods of ice adhesion strength on the surface of materials. *Proceedings of OMAE04, 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vancouver, BC, Canada, June 20–25, 2004.

Kermani, M., Farzaneh, M. & Gagnon, R. 2007. Compressive strength of atmospheric ice. *Cold Regions Science and Technology* 49, pp. 195–205.

Kivioja, S., Kivivuori, S. & Salonen, P. 2007. *Tribologia – kitka, kuluminen ja voitelu*. Helsinki, Helsinki University Press. 346 p.

Kloow, L. & Jenstav, M. 2006. High-speed train operation in winter climate. *Banverket, Gröna tåget*. 62 p.

Kloow, L. 2011. High-speed train operation in winter climate. *KTH Railway Group Publication 1106*. 77 p.

Kolisoja, P., Järvenpää, I. & Mäkelä, E. 2000. Ratarakenteen instrumentointi ja mallinnus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. *Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 5/2000*.

Korkeamäki, S. 2011. Rataan kohdistuva kuormitus liikkuvan kaluston ja radan vuorovaikutuksessa. Helsinki, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 04/2011. 93 s.

Lei, X. & Noda, N.-A. 2002. Analyses of dynamic response of vehicle and track coupling system with random irregularity of track vertical profile. *Journal of Sound and Vibration* 258(1), pp. 147–165.

Li, D., Elkins, J., Wu, H. & Singh, S. 1999. Characterization of track stiffness and damping parameters. Report No. R-930.

Liikennevirasto. 2010. Talvi 2009–2010 Suomen rautateillä – tapahtumat ja johtopäätökset. Helsinki, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 15/2010. 55 s.

Lähteenmäki, M. 2007. Värähtelymekaniikka. Opintojakson arkistomateriaali. Tampere, Tampereen ammattikorkeakoulu. 123 s. [WWW] [Viitattu 11.5.2012] Saatavilla: http://home.tamk.fi/~mlahteen/arkistot/vmek_ark.htm.

Makkonen, L. 1994. Ice and construction. Cambridge, University Press, RILEM Report 13. 97 p.

Martinec, J. 1977. Expected snow loads on structures from incomplete hydrological data. *Journal of Glaciology* 19 (81), pp. 185–195.

Meuler, A.J., Smith, J.D., Varanasi, K.K., Mabry, J.M., McKinley, G.H. & Cohen R.E. 2010. Relationships between water wettability and ice adhesion. *ACS Applied Materials and Interfaces* 2(11), pp. 3100–3110.

Minnis, A.J. 2010. Vampire Pro: Advanced tutorial guide. Simulating switches & crossings. Derby, UK, DeltaRail Group Limited, 29 p.

Mohamed, A.M.A. & Farzaneh, M. 2011. An experimental study on the tensile properties of atmospheric ice. *Cold Regions Science and Technology* 68 (2011), pp. 91–98.

Nelson, W.G. & Young, E.J. 1994. Adhesion of fresh and saline ice to bare and coated steel surfaces. *OMAE – Volume IV, Arctic/Polar Technology*, pp. 63–66.

Oksanen, P. 1982. Adhesion strength of ice. Espoo. VTT Research Report 123. 61 s. + liitt. 5 s.

Oksanen, T. 1999. Suomen lumipeitteen alueellinen vaihtelu. Pro gradu -tutkielma. Helsinki. Helsingin yliopisto, Geofysiikan laitos. 66 s.

Petrenko, V.F. & Qi, S. 1999. Reduction of ice adhesion to stainless steel by ice electrolysis. *Journal of Applied Physics* 86, 5450.

Petrovic, J.J. 2003. Mechanical properties of ice and snow. *Journal of Materials Science* 38 (2003), pp. 1–6.

Railway Technical Research Institute, Tokyo Japan. 2004. Clarification of phenomenon of ballast thrown up by snow/ice falling from the train. [WWW] [Viitattu 8.5.2012] Saatavilla: http://www.rtri.or.jp/eng/rd/seika/2001/01/safety_E02.html.

Rao, S.S. 1995. Mechanical vibrations. Addison-Wesley Publishing Company. 912 p.

Raraty, L.E. & Tabor, D. 1958. The adhesion and strength properties of ice. Proceedings of the Royal Society of London.

Rasmus, S. 2007. Lumen fysiikka ja lumiekologia. Talvitutkimuksen päivä, Helsingin yliopisto, 23.11.2007.

Ratahallintokeskus. 2000. Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 4 Vaihteet. Helsinki. 65 s. + liitt. 12 s.

Ratahallintokeskus. 2002. Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 11 Radan päällysrakenne. Helsinki. 87 s. + liitt. 26 s.

Ratahallintokeskus. 2004. Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 13 Radan tarkastus. Helsinki. 51 s. + liitt. 28 s.

Resiina-lehti. 2008. Tasoristeys-palsta 1/2008. [WWW] [Viitattu 8.5.2012] Saatavilla: <http://www.resiinalehti.fi/artikkeli/11>.

RIL. 2001. Lumirakenteiden suunnittelu- ja rakentamishjeet, RIL218-2001. Helsinki, Suomen rakennusinsinöörien liitto. 75 s.

Ryerson, C. 2008. Assessment of superstructure ice protection as applied to offshore oil operations safety. US Army Corps of Engineers. ERDC/CRREL Technical Report 08-14. 142 p.

Ryzhkin, I.A. & Petrenko, V.F. 1997. Physical mechanisms responsible for ice adhesion. Journal of Physical Chemistry B, 101 (1997), pp. 6267-6270.

Salmenperä, P. & Nurmikolu, A. 2012. Esiselvitys vaihteiden lumiongelmien ratkaisumahdollisuuksista. Tampere, TTY. 28 s.

Salmi, T. & Virtanen, S. 2006. Dynamiikka. Tampere, Pressus Oy. 480 s.

Samppala, P. 2011. Rautateille asennettujen pyörävoimailmaisimien mittausdata ja pyörävoiman raja-arvot. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. 100 s. + liitt. 35 s.

Schmid, F., Burstow, M., Clark, S., Eickhoff, B., Hiensch, M., Hsu, S. & Kent, S. 2010. Wheel-rail best practice handbook. University of Birmingham Press. 500 p.

Schulson, E.M. 2001. Ice: Mechanical properties. Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 2nd edition, Cambridge University Press, pp. 4006–4018.

Seligman, G. 1936. Snow structure and ski fields. London, Macmillan & Co. 555 p.

Seppings, R.A. 2005. Investigation of ice removal from cooled metal surfaces. Doctor of Philosophy thesis. London. University of London. 262 p.

Shapiro, L.H., Johnson, J.B., Sturm, M. & Blaisdell, G.L. 1997. Snow mechanics, Review of the state of knowledge and applications. US Army Corps of Engineers, CRREL Report 97-3, 08/1997.

Smith, K. 2010. Future points to brushes. *International Railway Journal*, January 2010.

Thomson, W.T. 1989. *Theory of vibration with applications*. 3rd edition, 2nd impression. London, Unwin Hyman Ltd. 467 p.

Tongue, B.H. 1996. *Principles of vibration*. New York, Oxford University Press. 464 p.

Transportation Technology Center Inc. 2010. Vertical and lateral dynamics. *Railway Derailment Course*. 167 p.

US Army Corps of Engineers. 2003. Progress in evaluating surface coatings for icing control at corps hydraulic structures. ERDC/CRREL Technical Note 03-4, 10/2003.

VR Group. 2011. VR Group tiedottaa: VR tehostaa talviliikennöintiä. [WWW] [Viitattu 11.4.2012] Saatavilla: http://www.vrgroup.fi/fi/vakiolinkit/VR-konsernitiedottaa/news_20110104114643.html.

WeatherOnline. 2012. Weather facts: drifting snow, blowing snow. [WWW] [Viitattu 27.2.2012] Saatavilla: <http://www.weatheronline.co.uk/>.

Wilen, L.A., Wettlaufer, J.S., Elbaum, M. & Schick, M. 1995. Dispersion-force effects in interfacial premelting of ice. *Phys. Rev. B* 52, pp. 12426–12433.

Xu, X., Jeronimidis, G. & Atkins, A.G. 2003. On the yield stress of frozen sucrose solutions. *Journal of Materials Science*, 38, pp. 245–253.

Xu, X., Jeronimidis, G., Atkins, A.G. & Trusty P.A. 2004. Rate-dependent fracture toughness of pure polycrystalline ice. *Journal of Materials Science*, 39, pp. 225–233.

Zhai, W. & Cai, Z. 1997. Dynamic interaction between a lumped mass vehicle and a discretely supported continuous rail track. *Computers and Structures* 63 (5), pp. 987–997.

Zou, M., Beckford, S., Wei, R., Ellis, C., Hatton, G. & Miller, M.A. 2010. Effects of surface roughness and energy on ice adhesion strength. *Applied Surface Science* 257, pp. 3786–3792.

Zw 900 NT Technical specification. 1997. Teknikum Oy.

Esiselvitys vaihteiden lumiongelmien ratkaisumahdollisuuksista

Johdanto

Lumi ja jää aiheuttavat ongelmia junaradoilla talvikaudella. Eniten ongelmia esiintyy vaihteissa, joiden toiminta saattaa häiriintyä lumen tai jään estäessä vaihteen kielien liikkeen. Lumi sataa vaihdealueelle tai saattaa siirtyä sinne tuulen mukana. Tuulen mukana kulkeutuva lumi haittaa yleensä liikennettä enemmän kuin suoraan satava lumi, sillä se kasautuu esimerkiksi raiteisiin korkeiksi kinoksiksi. Lisäksi kasaantuva lumi on kimmoisampaa eikä irtoa helposti rakenteista. Lunta ja jäätä myös putoaa veturin ja vaunujen pohjarakenteista ja teleistä. Kalustosta putoava aines on erityisen ongelmallista, sillä sitä voi tulla hetkessä suuria määriä, jopa tuhansia kiloja. Vaihteessa olevan raiteen epäjatkuvuuskohdan aiheuttama heräte johtaa lumen ja jään putoamiseen usein juuri vaihteen kohdalle.

Tässä esiselvityksessä kartoitettiin kirjallisuudesta ongelman ratkaisumahdollisuuksia, jotka jaoteltiin

- kaluston alustaan ja teleihin kerääntyvän lumen kiinnittymisen ehkäisymahdollisuuksiin
- hallittuihin lumen irrotusmenettelyihin kalustosta vaihdealueen ulkopuolella
- vaihdealueiden lumenpoistovaihtoehtoihin talvikunnossapidossa.

Lumen ominaisuuksista

Lumen ja jään eri muotoja on ryhmitelty sen mukaan, miten ne aiheuttavat kertymää rakenteisiin. Lumisade sinällään ei aiheuta kertymää kalustoon, sillä se ei tartu alapuolisiin pintoihin tai vertikaaleihin pintoihin paitsi jos pinta on kostea tai lämmin tai lumi on vetistä (Ryerson 2008). Toisaalta talvella 2010 VR:n henkilöliikennejohtaja kertoi haastattelussa lumen kulkeutuvan puuterimaisena vaihteisiin ja aiheuttavan siinä ongelmia (Suomen kuvalehti, 2010). Kulkeutuvan ja pakkautuvan lumen tiheys kasvaa sen puristuessa voimakkaassa tuulessa rakenteita vasten. Colbeckin (1980) mukaan lumen kimmomoduuli kasvaa eksponentiaalisesti tiheyden kasvaessa. Tuulen mukana kulkeutuva pakkautuva lumi on hankalampi poistaa vaihteesta kuin satava lumi.

Tavallisesta pakkaslumisateesta poikkeavia muita mahdollisia lumiongelmia aiheuttavia ilmiöitä on lueteltu seuraavassa (Ryerson 2008):

- Alijäähtynyt vesisade (clear ice, atmospheric icing, glaze ice) edustaa märkää jään kasvua ja aiheuttaa ongelmia mm. meri- ja ilmaliikenteessä. Kertymien kerrospaksuudet ovat meriliikenteessä tyypillisesti alle 30 mm, ja ne ovat väriltään läpinäkyviä. Alijäähtynyt vesisade on yleinen jääongelmien aiheuttaja lentoliikenteessä. Yhdysvaltalaisen tutkimuksen mukaan suurimman jääkuormituksen rakennuksille aiheuttaa alijäähtynyt vesisade. Kaikki avoimet rakenteet ovat alttiina jäätymiselle, ja suhteellisesti suurimmat kuormitukset jäältä muodostuvat kevyisiin rakenteisiin (ASCE Standard No. 7-05, 2005).

- Kuurajää (rime ice, lake-effect snow), edustaa kuivaa jään kasvua ja muodostuu kun kaasumainen vesi härmistyy kiinteäksi ja on väriltään valkoista. Kuurajää aiheuttaa eniten painokuormitusta öljylautoilla, joilla muodostumisnopeus pinnoilla voi olla jopa 25 mm tunnissa. Ominaispainoltaan kuurajää on kuitenkin alhaista. Se kertyy tehokkaimmin pienikokoisiin rakenteisiin, joten ongelmia voidaan välttää pintojen muotoilulla. Kuurajää irttoa helpoiten vasta ilman lämmitessä. Kuurajää voi muodostua myös suojausten alle, jos ilma pääsee vapaasti kiertämään. Tämä tulee huomioida alustan ja telien kotelo-ratkaisuja suunniteltaessa. Vaikka kuurajää ei lisää jääkuormaa merkittävästi, se toimii alijäähtyneen veden kerääjänä ja näin ollen nopeuttaa jään kerääntymistä.
- Huurre (frost) muodostuu kun ilmankosteus nousee maksimiin ja alkaa tiivistyminen. Meriliikenteessä huurre muodostaa lähinnä liukkauteen liittyviä turvallisuusongelmia, sillä kerrospaksuudet ovat vain joitain millimetrejä. Huurre ei muodosta sinänsä jäätä ongelmaksi asti.
- Rakeet (sleet) eivät muodosta juuri lumiongelmaa koska eivät tartu pintoihin.
- Pöllyävän veden jäätyminen (sea spray icing) on merkittävässä roolissa meriliikenteen jääongelmissa. Se ilmenee lievällä pakkaskelillä, kun pisaramainen vesi törmää rakenteisiin ja jäätyy. Tämä tuskin muodostaa raideliikenteessä merkittäviä ongelmia.

Jää tarttuu pintoihin adheesiovoimalla, jonka suuruus riippuu mm. pintamateriaalista, lämpötilasta ja suolapitoisuudesta. Makkosen (1994) mukaan suolaton vesijää muodostaa lujimman sidoksen teräkseen noin -15 °C lämpötilassa. Lumijään tarkempi koostumus ja rakenne vaikuttavat myös sidoksen lujuuteen.

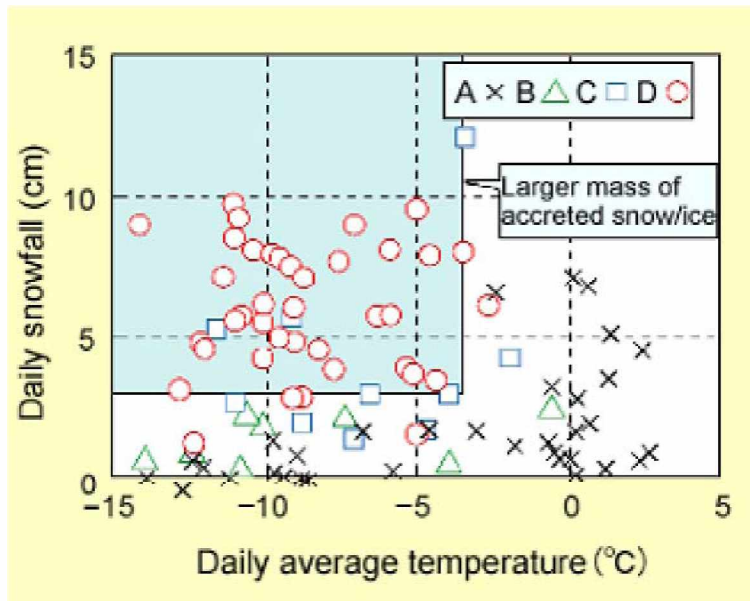
- Pöllyävä lumi (drifting snow) Vaikka lumi ei sinällään tartu pystypintoihin tai alapuolisiin pintoihin. Lujassa tuulessa kulkutuvan lumen on raportoitu pakkautuvan tiiviiksi ja kovaksi esteitä vasten. Ilmiössä puhutaan lumen sintrautumisesta kiinteäksi ja nopeusero pinnan ja lumen välillä vaikuttaa sintrautumisen lujuuteen. Lumen tiiviys haittaa sen irrottamista ja poistoa. Sama ilmiö tapahtuu ilmeisesti nopeissa junissa, kun pöllyävä lumi osuu junan teli – ja alustarakenteisiin kovassa virtauksessa. Tällaista lunta kutsutaan pöllyäväksi lumeksi ja otollisissa tuuliolosuhteissa sitä voi olla todella paljon, katso kuva 1. Pöllyävän lumen haittoja ehkäistään erilaisilla suojuksilla, kuten lumiaidoilla, lumiharjoilla ja vaihdesuojilla, katso luvut 4.1.4–4.1.5.



Kuva 1. Pöllyävä lumi kulkeutuu kiskoille (Kloow, Jenstav 2006).

Kloowin ja Jenstavin (2006) mukaan lumen kerääntymisessä juniin on kaksi erityisen epäedullista olosuhdetta. Toinen on pöllyävän lumen esiintyminen kuivalla ilmalla. Lumi koostuu erittäin hienoista hiukkasista, jotka voimakkaissa virtausolosuhteissa pakkautuvat junan rakenteisiin. Pakkautumista tapahtuu pääasiassa teleissä ja junan alustassa. Tämä voi vaikuttaa telin liikeulottuvuuksiin rajoittavasti. Teli ei välttämättä pysty kääntymään tai kallistumaan halutusti tai jousituksen liikematkat voivat olla rajoittuneita. Tämä lisää kiskovoimia. Toinen olosuhde on nollalämpötilan sivuuttaminen siten, että lumi sulaa ja jäätyy uudelleen jääksi. Junan voi käydä välillä lämpimällä vyöhykkeellä tai pysähtyneen junan jarrujen lämpö voi sulattaa lunta. Esimerkiksi tunneleissa tai rannikolla voi tyypillisesti olla lämpimämpi alue, jossa lumi pääsee sulamaan. Kun lumi jäätyy uudelleen tiheämmäksi jääksi, se toimii kantavampana alustana edelleen kertyvälle lumelle (Kloov, Jenstav 2006).

Japanilaisen kenttätutkimuksen mukaan olosuhteet, joissa lunta ja jäätä kertyy runsaimmin, syntyvät, kun päivittäinen lumisateen määrä ylittää 30 mm ja lämpötila on alle -4°C . Tämä esitetään kuvassa 2, jossa on esitetty neljä kalustoon kerääntyvän lumen määrän tasoa, joista $A < B < C < D$.



Kuva 2. Lumen kerääntyminen kalustoon eri lämpötiloissa Kloovin ja Jenstavin (2006) mukaan

Jääongelmat ja niiden ratkaisut meri- ja lentoliikenteessä

Lumi ja jää aiheuttavat ongelmia myös muille liikennemuodoille. Meriliikenteessä lumikuormat voivat ilman toimenpiteitä kasvaa vaarallisen suuriksi. Ongelmia tosin lisää avoveden vaikutus, mutta avovesi lisää lumiongelmaa myös maalla, esimerkiksi Suomen etelärannikolla. Lentoliikenteessä ongelmia aiheuttavat mm. äärimmäiset lämpötilan vaihtelut.

Avoimet kannet, joilla on pieniä rakenteita kärsivät eniten kertyvästä lumikuormasta. Ryersonin (2008) mukaan verkkomaiset ja ristikkomaiset metallirakenteet keräävät erityisesti jäätä, minkä syynä on korkea keruutehokkuus (collection efficiency) kuurajään muodossa. Kuurajään kerääntymisen minimoimiseksi laivaliikenteessä on suositeltu kaikkien tarpeettomien pienikokoisten muotojen, esimerkiksi teräkiristimien, ulos tulevien pultin päiden yms., pois jättämistä. Sileät pinnat vastustavat kuuran aiheuttamaa jäätymistä tehokkaasti, mutta jos sama ilma pääsee kiertämään mahdollisen koteloinnin alle, ovat pienet rakenteet siellä myös samassa vaarassa kuurajäätymiselle.



Kuva 3. Mekaaninen suojaus telissä saattaa lisätä kuurajään kertymistä.

Rakenteita suojataan myös koteloinnilla, vaikka sillä kuurajäätä ei välttämättä tehokkaasti saadakaan poistettua. Koteloinnin tarkoituksena onkin olla enemmän mekaaninen suojaus korkeista rakenteista putoavaa jäätä vastaan. Nykyään laivojen kaikki hyllyköt, putkihyllyt, nosturit, vinssit yms. suositellaan suojattaviksi koteloinnilla putoavalta jäältä.

Vesihöyryllä poistetaan jääkertymiä. Sähköä johtavia pinnoitteita suositellaan esim. ikkunoihin, mahdollisesti yhdistettynä jääfobisiin pinnoitteisiin. Infrapunatekniikkaa ollaan ottamassa Ryersonin (2008) mukaan lumensulatustestaukseen. Vähäadhesiiviset pinnoitteet viivyttävät jäätymisen alkua, mutta teho laskee nopeasti toistuvien jäätymisien mukana. Suurpainevesisuihkuilla on jäätä myös irrotettu tehokkaasti. On harkittu myös konseptia, jossa rakenteet suojataan verkolla, johon jää kertyy. Jään kertymistä voidaan hallita irrottamalla verkko säännöllisesti (Ryerson 2008).

Ryersonin (2008) mukaan laivaston kokeissa testattiin useita jäänpoistomenetelmiä, kuten värähtelyä, erilaisia jääfobisia pinnoitteita, lämmitysratkaisuja ja pullistettavia neopreenituubeja jään irrotukseen. Näistä tehokkaasti toimi ainoastaan pneumaattiset neopreenituubit rakenteiden ja paneelien suojana. Tuubeihin annettiin painepulsseja, jotka poistivat suurimmalta osin jään. Pneumaattinen järjestelmä kuluttaa vähän tehoa ja paneeleita voidaan muotoilla halutuilla tavoilla. Ne ovat kuitenkin kalliita, painavia ja helposti vahingoittuvia. Niitä käytetään yleisesti keskisuurten lentokoneiden siivissä.

Menetelmien kartoitus vaihteiden lumiongelmiin välttämiseksi

Lumi aiheuttaa ongelmia eniten vaihteissa, mutta kulkeutuu vaihteisiin usein kaluston mukana. Lumiongelmiin ratkaisuksi kartoitettiin erilaisia vaihtoehtoja, jotka jaoteltiin vaihteiden lumenpoistovaihtoehtoihin talvikunnossapidossa (luku 4.1), kaluston alustaan ja teleihin kerääntyvän lumen kiinnittymisen ehkäisymahdollisuuksiin (luku 4.2) ja hallittuihin lumen irrotusmenettelyihin kalustosta vaihteiden ulkopuolella (luku 4.3).

Lumen poisto vaihteista

Paineilmalaitteet

Paineilmalaitteita voidaan käyttää eri tavoin lumen ja jään poistoon. Tampereen alueen vaihteiden talvikunnossapitoa on tehostettu radan kunnossapitäjänä toimivan VR-Track Oy:n toimesta uusilla vaihteiden kannettavilla puhtaaksipuhalluslaitteilla. Resiinalehden (2008) mukaan puhaltimia varten tarvittava paineilma kehitetään raitien välissä olevilla kompressoreilla. Iltalehden artikkelin (2010) mukaan Venäjällä on rakennettu suuria kompressorikeskuksia rautatieasemien yhteyteen. Paineilma ohjataan kiskoja väliin. Lisäksi Venäjällä on asemilla käytössä suurempia määriä henkilökuntaa lumen lakaisemiseen.

Lämmitys

Suomen rataverkon vaihteista hieman yli puolessa on vaihteenlämmitys käytössä. Kiskoja lämmitetään vastuksilla jotka saavat sähkönsä usein suoraan ratajohdosta vaihteenlämmitysmuuntajan avulla. Jatkuva lämmitys talvikaudella aiheuttaa kuitenkin liikaa jäätyvää vettä tukikerrokseen, joten lämmitystä pitää ohjata valituilla menetelmillä. The Telegraph (2007) – lehden mukaan yksinkertaiseen lämmön mittaukseen perustuvat menetelmät eivät aina toimi, sillä vaihteet tukkivaa lunta esiintyy myös suojakelillä. Teerihalmeen (2011) mukaan taloudellisista syistä on myös kokeiltu maalämpöä ja suunniteltu kaukolämmön kokeilemistä energianlähteenä. Kloovin ja Jenstavin (2006) mukaan lumiharjat (ks. luku 4.1.5), jotka suojaavat kiskoja pölyävältä lumelta, eristävät kiskoja ulkoilmasta ja vähentävät lämmityksen hukkalämpöä. Venäjällä ja Pohjois-Amerikassa vaihteita on lämmitetty myös suihkumoottoritekniikalla, jossa vaunuun on liitetty lunta lämmittävä ja pois puhaltava suihkumoottori (Automerkit.fi, 2009, YouTube, 2008). Tässä on vaarana että tukikerroksen sepele poistuu lumen mukana. Maailmalla on käytetty myös induktiivisia sekä infrapunatekniikkaan perustuvia kiskolämmittimiä.

Yksinomaan vaihteenlämmitys ei välttämättä toimi kulkeutuvan lumen tapauksessa kovin hyvin; sen tulisi sulattaa satava lumi, mutta pahimmillaan se toimii pinnan kostuttajana, joka erityisesti kerää kulkeutuvaa lunta. Siksi kulkeutuvaa lunta tulisi rajoittaa vaihteenlämmityksen käytössä esimerkiksi lumiaidoin tai lumispoilereihin (ks. luku 4.1.5).



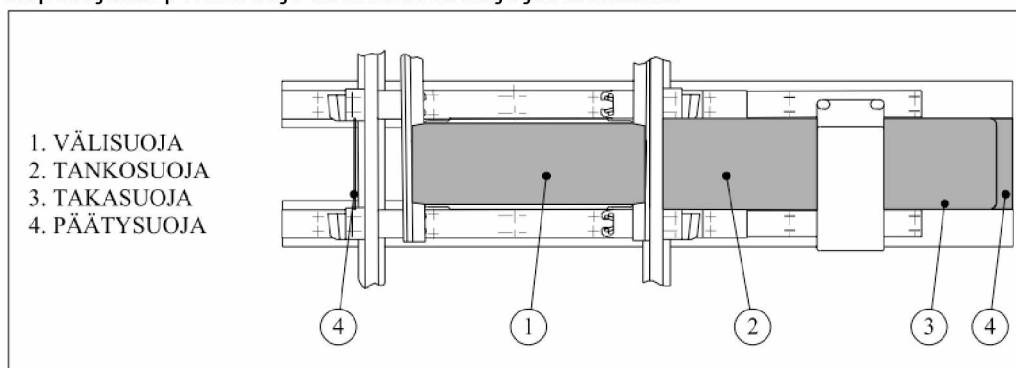
Kuva 4. Amerikkalainen lumensulatusvaunu suihkumootorilla (This Blue Marble, 2008)

Mekaaninen poisto

Lumen ja jään mekaaninen poisto on usein viimeinen ja varmin keino lumen poistoon vaihteista. henkilöresurssit eivät Suomessa tosin aina tähän riitä. Käytännössä mekaaninen poisto on lumen harjausta, lapiointia ja lumiharja- ja lumilinkityökoneiden käyttöä. Tiiviillä ratapiha-alueilla runsaslumisina talvina ongelmaksi muodostuu lumen varastointipaikkojen ehtyminen. Ruotsi kokeilee talvella 2011–2012 lumen harjaus – ja sulatusvaunun yhdistelmää (ks. luku 4.1.6).

Lumisuojat

Vaihteiden lumisuoja käytetään suojaamaan vaihteen kääntö- ja tarkastustankoja lumelta ja jäältä. Ne estävät lumen pakkautumisen vaihteen toiminnan kannalta kriittisiin kohtiin, katso kuva 4. Materiaaleina on Suomessa käytössä vesivaneri, alumiini ja lujitemuovi (RATO, osa 4., 2000). Kloovin ja Jenstavin (2006) mukaan lumisuojat eivät ole toimiva ratkaisu nopeammalle junaliikenteelle; ne hajoavat tai irtoavat puutoavan jään ja voimakkaiden ilmavirtauksien seurauksena. Edellä mainituista syistä nopeat junat poistavat jo itsessään lunta ja jäätä radalta.



Kuva 5. Vaihteen lumisuojauskohteet RATO osan 4 mukaan.

Lumiaidat ja lumiharjat

Tampereen alueen vaihteiden talvikunnossapitoa on tehostettu VR-Radan toimesta uusilla vaihteiden lumenkeräysharjoilla. Harjat on koemielessä asennettu tammikuus-

sa 2008 muutamiin vaihteisiin Tampereen asemalla ja Lielahdessa (Resiinalahti 2008). Smithin (2010) mukaan Ruotsissa lumiharjat on standardoitu Banverketin käyttöön ja niistä on saatu hyviä kokemuksia menneinä talvina.



Kuva 6. Ruotsin standardoimat lumiharjat (Railway-technology.com, 2011).

Lumen sulatusvaunu

Ruotsi hankkii talveksi 2011–2012 erityisen lumenraivaajan, joka koostuu lumenkeräimestä ja sulatusvaunusta (Railcare Snow Removal 700). Sulatettu lumi siirretään seuraavaan vaunuun. Laite on suunniteltu ahtaille ratapihoille, joissa ei ole tilaa aurata lunta sivusuunnassa. Vesi voidaan valuttaa viemäriin tai imeytyskenttään. Laitteella pystytään poistamaan 15 cm paksu lumikerros 5 metriä leveältä ja 700 metriä pitkältä alalta puolen tunnin välein (Tekniikka&Talous, 2011). Vaunun vaatima lämmitysteho on luonnollisesti suuri.



Kuva 7. Railcare SR 700 Lumensulatuslaitteisto (Tekniikka&Talous, 2011)

*Kalustoon kohdistettavat lumen ja jään kerääntymisen ehkäisymenetelmät***Alustan ja telien kotelointiratkaisut**

Pendolino-junien alustojen mekaanista suojausta parannetaan vuodesta 2011 lähtien (Alstom, 2011). Suojauksen tarkoituksena on estää alustaan iskeytyvästä raide-sepelistä, lumesta ja jäädästä syntyviä vaurioita. Kotelointiratkaisuiden eduista on risti-riitaista tietoa. Niiden tarkoitus on estää lumen kerääntyminen alustan rakenteisiin. Toisaalta ne eivät estä kaasumaisen veden härmistymistä kiinteäksi kuurajääksi (Ryerson 2008). Lisäksi Kloowin ja Jenstavin (2006) mukaan koteloinnit voivat toimia päinvastoin lumenkerääjinä ja hidastaa myös lumen sulatusta huoltohalleissa toimimalla eristeenä. Avonaiset telirakenteet keräävät vähemmän lunta kuin suhteellisen suljettu rakenne. Rakenteet telissä, joiden täytyy pystyä liikkumaan, tulisi kuitenkin suojata taipuisalla pleksillä tai ohuilla vaahtokumikerroksilla, katso kuva 8. Kloowin ja Jenstavin (2006) mukaan kaikki kertyvä jää näissä rakenteissa putoaa pois muodonmuutoksien johdosta.



Kuva 8. Ohut pleksi suojaa liikkumavaraa telissä. Primäärijousitus kuvassa alaoikealla. (Kloow, Jenstav 2006)

Telien lämmitysputket

Pendolino-junien telirakenteisiin kertyvän lumen ja jään sulattamiseksi teleihin asennetaan putket, joissa kierrätetään sulatusvettä varikolla. Uudistus toteutetaan vuosina 2011–2015. Aiemmin on ollut haasteellista sulattaa telit varikkoajan kuluessa. Putket kohdennetaan telien kallistusjärjestelmien lämmittämiseen, sillä ne eivät ole toimineet luotettavasti talvella. Järjestelmän toimimattomuus on puolestaan laskenut ajonopeuksia (Alstom, 2011).

Jäänestoaineet

Jäänestoaineet perustuvat alhaiseen jäätymislämpötilaan ja vesiliukoisuuteen ja niitä käytetään monella eri tavalla raideliikenteessä (Kloow, Jenstav 2006). Jäänesto ehkäisee jään kerääntymistä sekä nopeuttaa etukäteen muodostuneen jään irtoamista. Ilmalan ratapihalle asennetuista jäänestolaitteista on vuonna 2011 saatu positiivisia

tuloksia, katso kuva 9. (Iltalehti, 2011). Jäänestopaikalla on keruuallas, josta ylimääräinen jäänestoaaine kerätään talteen (Rail.co, 2011). Jäänestoa voidaan käyttää myös kohdennetusti vaihteissa tai kuljettaa laitteistoa vaunussa mukana esimerkiksi kiskon sulatukseen. Jäänestoaaineet pohjoismaissa ovat propyleeniglykolia. NASA on patentoinut niin kutsutun 'älykkään fluidin' nimeltä Ice Free Switch, joka koostuu dietyleeniglykolista ja propyleeniglykolista. Seoksen tarkoituksena on toimia epänewtonilaisesti, tässä tapauksessa pysyä paikallaan kunnes lumen ja jään saapuessa se aktivoituu sulatukseen. (Midwest Industrial Supply, 2010) Aineella on siis parempi kulumuskestävyys, joten tuuli tai sade ei vie seosta yhtä nopeasti pois rakenteista.

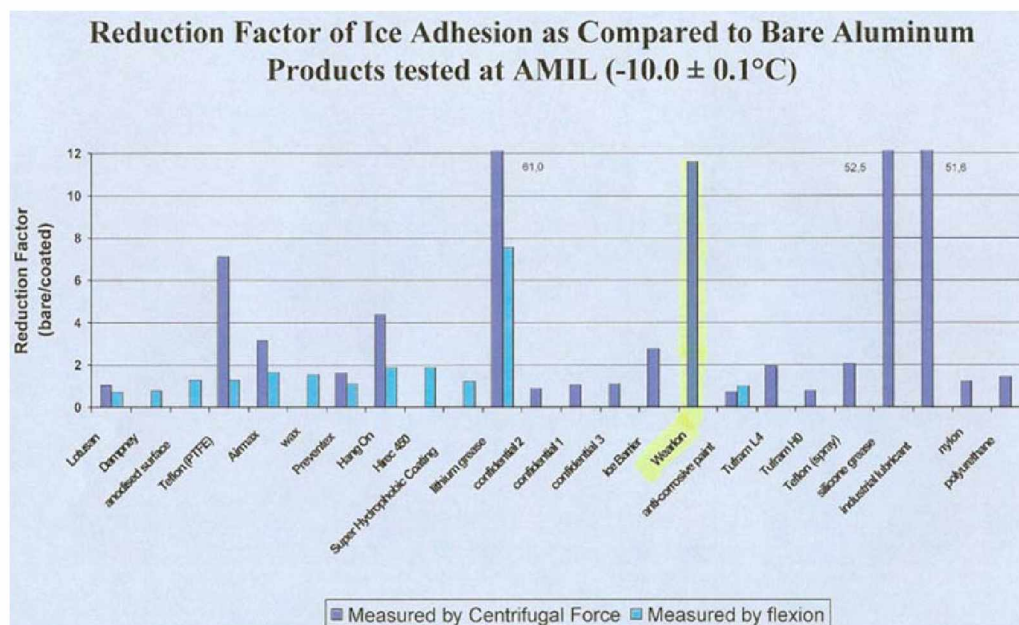
Englannissa ongelmia aiheuttaa paljolti virtakiskon jäätyminen ja siitä aiheutuvat pysähdykset. Tähän on ratkaisuna hankittu vaunuihin asennettavia jäänestolaitteita, jotka suojaavat virtakiskoa jäätymiseltä (Network Rail, 2011).



Kuva 9. Ilmalan ratapihalla sijaitseva jäänestolaitte suojaaa alustaa jäältä (Iltalehti, 2011).

Jäätä hylkivät materiaalit

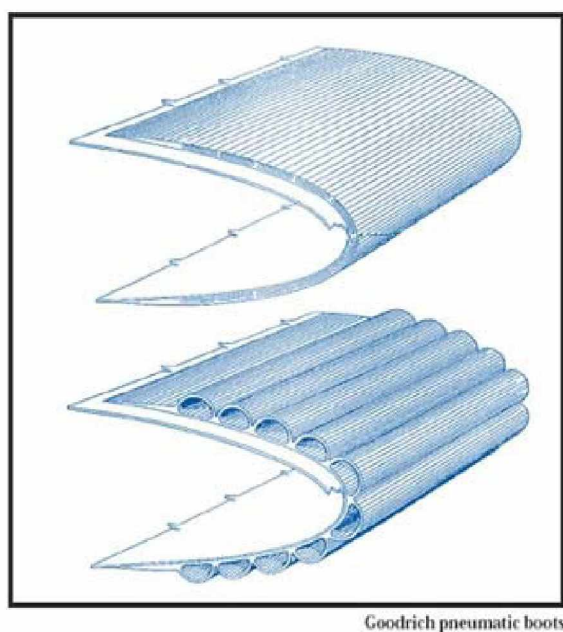
Jäätä hylkiviä materiaaleja eli jääfobisia materiaaleja on käytetty menestyksellä ilma- ja meriliikenteessä. Käytännössä ne ovat useimmiten maaleja, joten asennus voidaan toteuttaa myös jälkikäteen. Niitä on myös sovellettu tuulimyllyjen siipiin, kattoihin, siltoihin ja sähkölinjoihin. Aiemmin pinnoitteiden ongelma on ollut irtoavuus ja poishuuhtoutuvuus, sillä parhaan adheesion alenemiskertoimen aineita ovat yleensä erityyppiset rasvat. Nykyään niiden rinnalle on tullut useita ns. älykkäitä pinnoitteita, joiden pysyvyys on esitetty paremmaksi. Oleellinen ominaisuus on jään luonnollinen irtoaminen heikon adheesion johdosta jääkerroksen kasvettua liian paksuksi ja ras- kaaksi, toisin sanoen itsestään irtoaminen. Pinnoitteissa voidaan myös käyttää mikro/nanoskaalan rakenteita, joilla ominaisuuksia voidaan hallitusti säätää. Illinoisin yliopistossa kehitetään nanopinnoitetta, joka on itsepuhdistuva, jääfobinen ja sähköä johtava jolloin sitä voidaan myös lämmittää (PhysOrg.com, 2011). Tällaisten uusien pinnoitusaineiden markkinoille tulo saattaa mahdollistaa uusia menetelmiä myös rai- deliikenteen lumi- ja jääongelmiin.



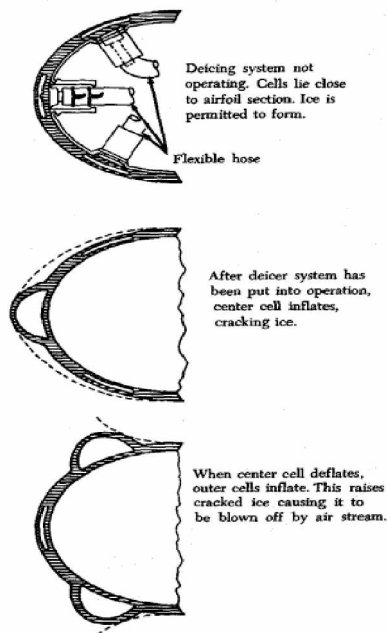
Kuva 10. Joidenkin jääfobisten pinnoitteiden adheesiokertoimia (Wearlon, 2011).

Jäänpoistokengät (deicing boots)

Jäänpoistokengät ovat yleisesti käytetty ratkaisu keskikokoisten lentokoneiden siipien jäänpoistoon. Suurissa lentokoneissa sen sijaan käytetään tyypillisesti siipien lämmitystä jäänpoistoon. Jäänpoistokenkiä on onnistuneesti sovellettu myös laivan jäänpoistoon. Kengät muodostuvat neopreenituubeista, joihin pumpataan paineilmaa pulsseina sopivin väliajoin. Muotoaan muuttava tuubi irrottaa lumen ja jään tulosten mukaan suurimmaksi osaksi (Ryerson, 2008). Kengät voidaan muotoilla kohteena olevien pintojen mukaisesti. Jäänpoistokenkien huonoiksi puoliksi voidaan mainita paino, hinta ja herkkä vahingoittuvuus. Toisaalta junakalustoon suunniteltu jäänpoistotuubi ei vaadi yhtä suurta luotettavuutta ja käyttövarmuutta kuin lentokoneen siivessä, jolloin hinta voi olla hyvinkin paljon halvempi. Raaka-ainekustannukset neopreenisten tuubien valmistamiseksi ovat alhaiset.



Kuva 11. Jäänpoistokenkä tyhjänä ja täynnä (Ryerson, 2008).



Kuva 12. Jäänpoistokengän toimintaperiaate (Ryerson, 2008).

Mahdollisuudet lumen ja jään hallittuun irrottamiseen kalustosta

Lumi ja jää putoavat kiskojen epäjatkuvuuskohtien synnyttämien iskujen seurauksena juuri vaihdealueelle, mahdollisesti estäen vaihteen toiminnan. Tästä syystä lumi ja jää tulisi tiputtaa hallitusti vaihdealueen ulkopuolella. Luku 4.3 käsittelee eri menetelmiä, joilla hallittu lumenpudotus voidaan toteuttaa.

Kiskon epäjatkuvuuskohta eli ”kiskopomppu”

Nykyaikaiset jatkuvaksi hitsatut kiskot aiheuttavat hyvin vähän värähtelyjä kalustoon. Ajettaessa vaihteiden yli lumi ja jää irtoaa kalustosta ja tukkii niitä. Tästä syystä on suunniteltu ja testattu tarkoituksenmukaisia ”kiskopomppuja”, joiden tarkoituksena on irrottaa lunta ja jäätä kalustosta hallitusti vaihdealueen ulkopuolella (Junnikkala, Untinen 2011). Kuvassa 11. on esitetty radalla testattuja epäjatkuvuuskohtia sekä tien jousituksen vapauttamiseen käytettyjä kiskopomppuja



Kuva 13. Radalla testatut epäjatkuvuuskohdat (Junnikkala, Untinen 2011) ja kiskopomppu (Nummelin, 2011).

Ratatekniset ohjeet raiteen tasaisuudesta kuitenkin rajoittavat pompun geometriaa merkittävästi. Alla esitetyissä taulukoissa 1. ja 2. on esitetty rajoituksia radan geometrialle (RATO osa 14, 2002). Esimerkiksi kunnossapitoa edellyttäväksi määritelty D-luokan virhe kunnossapitotasolla 1A sallii maksimissaan 4 mm korkeuspoikkeaman 5m mittakannalla (taulukko 1). Kieroudelle (viistekulmalle) asetetut raja-arvot (taulukko 2) ovat pompulle mahdollisen geometrian kannalta vielä rajoittavammat.

Taulukko 1. Korkeuspoikkeamien raja-arvot (mm), tulostuskanta 5 metriä. (RATO osa 14, 2002)

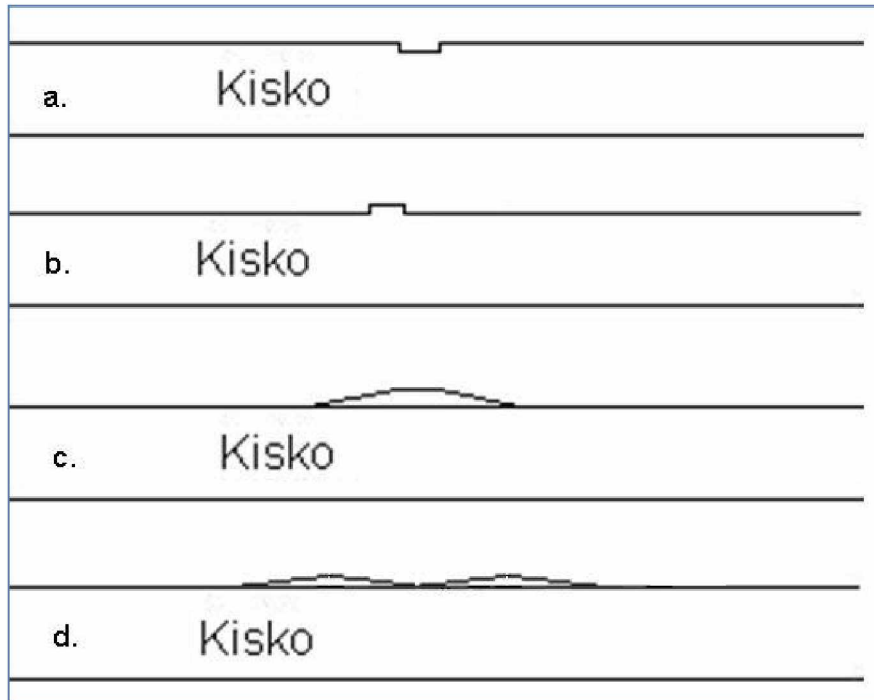
Virheluokka	Kunnossapitotaso							
	1AA	1A	1	2	3	4	5	6
C	2	2	3	4	5	6	7	8
D	4	4	5	6	7	8	9	10
★	7	7	8	9	10	12	13	14

Taulukko 2. Kierouden raja-arvot. Kierous on ilmoitettu viistelukuna ja millimetreinä 3,5 metrin mittakannalla. (RATO osa 14, 2002)

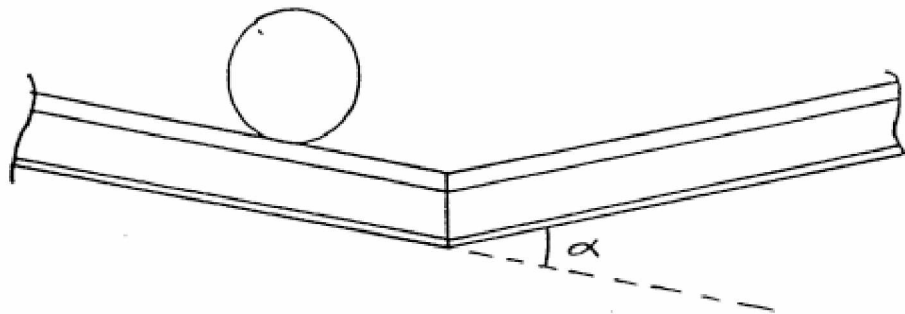
Virheluokka	Kunnossapitotaso							
	1AA	1A	1	2	3	4	5	6
C	1160/3	1160/3	700/5	585/6	500/7	440/8	390/9	350/10
D	500/7	500/7	440/8	390/9	350/10	290/12	250/14	220/16
★	390/9	390/9	320/11	290/12	270/13	235/15	205/17	165/21

Aiemmin radalla testattu epäjatkuvuuskohta oli lovettu kiskoihin pystyreunaiseksi. Koska aineenpoisto kiskoista ei ole kaikissa tapauksissa suotavaa, olisi soveliaampi ratkaisu kohoama kiskossa. Yli ajavat pyörät pyöristävät kohoaman runoja, jolloin siitä tulee loivareunainen. Tämä vähentää iskuvoimaa, joka on epäjatkuvuuskohdan kulman funktio (Schmid 2010). Kulmaa kuitenkin saadaan tarvittaessa kasvatettua muotoilemalla kaksi pomppua, joiden välisestä asemasta suurin iskuvoima syntyy.

Kiskopompun muodon hahmotelmat ja niiden kehitys näkyy kuvassa 14. Alun perin testattu muoto oli lovi kiskossa (Junnikkala, Untinen 2011). Kiskoja ei kuitenkaan haluta vaurioittaa, joten aineen lisääminen johtaa muotoon b. Muoto on epästabiili, sillä terävät reunat pyöristyvät nopeasti raideliikenteessä. Tämä johtaa seuraavaan c.-malliin. Koska muodolla on vaikeampi saada aikaan merkittävää iskua, voidaan kiskolle asentaa kaksi kolmiota, joiden välissä tapahtuu voimakkain isku, kulmamuuoksen tuplaantuessa c-muodosta, kuvan 14. tapaan.



Kuva 14. Erilaisia hahmotelmia kiskopompun muotoon.



Kuva 15. Lovikulma α .

Alla on esitetty joillekin viistekulmille laskettuja iskuvoimia P1 ja P2. P1 voima kuvaa pyörän värähtelyä kiskoja vasten vastavaiheessa. P2 voima muodostuu kun pyörä, kisko ja pölkky värähtelevät tukikerrosta vasten. Voimien arviointiin on käytetty klassisen tapauksen kaavoja, 1 ja 2 alla. Schmidin (2010) mukaan Jenkins et al. (1974) ovat esittäneet P2 -voimalle kaavan 2. mukaisen laskentamallin,

$$P1 = \alpha V \sqrt{\frac{k_H m_s}{1 + m_s/m_u}}, \quad 2 \approx 0.7 \alpha V \sqrt{k_r m_u} \quad (1, 2)$$

jossa α on lovikulma, V nopeus, k_H Hertsin kontaktijäykkyys, m_s efektiivinen radan massa, k_r pyöräkerran yhdistetty jäykkyys ja m_u on vaunun jousittamaton massa. Näiden arvot ja estimaatit laskentaan on otettu lähteestä Hakulinen et al. (2011).

Seuraavassa esitetään iskuvoimien P1 ja P2 laskentaa erilaisille epäjatkuvuuskohdille nopeudella 72km/h:

- Viistekulma 1/440 (virheluokka D, k.p.taso 1)

$$P1 = 9,9 \text{ kN}, P2 = 1,9 \text{ kN}$$

- Viistekulma 1/390 (virheluokka D, k.p.taso 2)

$$P1 = 11 \text{ kN}, P2 = 2,1 \text{ kN}$$

- Viistekulma 1 ° (2mm / 125mm)

$$P1 = 69 \text{ kN}, P2 = 13 \text{ kN}$$

- Viistekulma 2,3 ° (2mm/ 50mm), vastaa kiskon jatkosraon aiheuttamaa kulmanmuutosta olettaen pyörän halkaisijaksi 500mm ja jatkosraon pituudeksi 20mm.

$$P1 = 174 \text{ kN}, P2 = 33 \text{ kN}$$

- Viistekulma 15 ° (30mm / 125mm)

$$P1 = 1045 \text{ kN}, P2 = 198 \text{ kN}$$

Tuloksiin liittyen: Staattinen kuorma vaunun painosta on tyypillisesti 50 kN- 250 kN . Nopeus on P1 ja P2 voimissa lineaarisesti verrannollinen voimaan. Virheluokat ja kunnossapitotasot ovat RATOn (osa 14) määritteitä.

Iskuilla on kolme funktiota. Niiden aiheuttama värähtely kulkeutuu telirakenteeseen ja sen kautta junan alustaan. Korkeataajuinen värähtely voi aiheuttaa riittävän suuren kiihtyvyyden rakenteisiin, jotta lumi ja jää irtoavat adhesiivisesta liitoksesta rakenteeseen. Toisaalta värähdysmuodot voivat joissain rakenteissa aiheuttaa riittävää taipumaa, jolla jään ja rakenteen liitos voidaan myös purkaa. Kolmantena peräkkäin eri kiskoille asennetuilla epäjatkuvuuskohdilla voidaan pyrkiä herättämään vaunun 'Lower sway mode' (Iwnicki, 2006) ominaismuoto, jotta telien jousituksiin kiinnittynyt jää irtoaisi vaunun keinuessa poikittain. Tämän muodon taajuus on tyypillisesti yli 0,5 Hz.

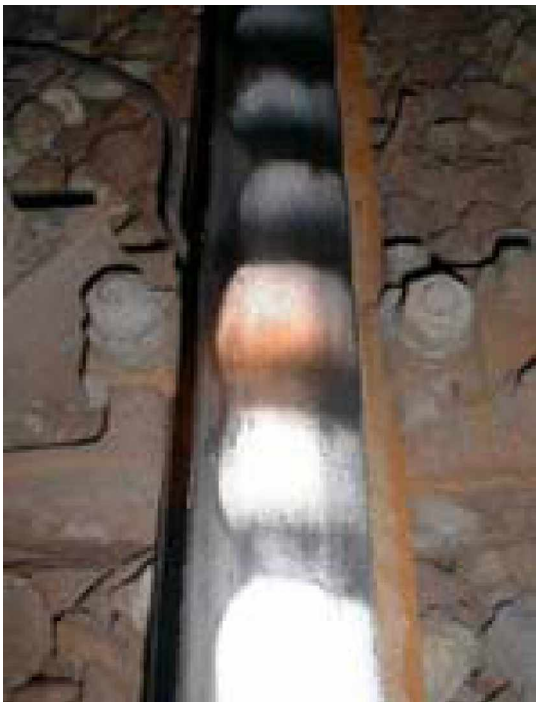
Pompun kenttätestaus voitaisiin toteuttaa esimerkiksi ratapihan sivuraiteella seuraavia periaatteita mukaillen:

- Ratapihan sivuraide (vetokalusto ja lumiset vaunut käytettävissä)
- Muutoskulmaltaan erilaisia (ajosuunnassa kasvavia) pomppuja
- Jäisiä vaunuja varattuna, ajetaan pomppujen yli (mahdollisesti eri nopeuksilla)
- Kiihtyvyyssmittaus kriittisistä telin kohdista (mahdollisesti myös radasta pomppujen kohdilta)
- Videokamerakuvaus vaunun alta; mikä pomppu irrottaa jään

Tuloksena voitaisiin selvittää kiihtyvyyden ja jään irtoamisen yhteys sekä pompun muodon ja jään irtoamisen yhteys. Tässä on myös huomioitava olosuhteet, joiden kirjaaminen on hoidettava huolellisesti; lumen irtoaminen on voimakkaasti olosuhderiippuvaista. Esimerkiksi lämpötila vaikuttaa jään adheesion voimakkuuteen.

Kiskon aaltokorrugaatio

Aaltoileva korkeuskorrugaatio raiteessa synnyttää värähtelyjä, joiden taajuus on aallonpituuden ja vaunun nopeuden funktio. Telirakenteiden ominaistaajuuksille sijoitettu heräte voimistaisi niiden värähtelyä pienemmälläkin korrugaatioamplitudilla ja tarvittava liike-energia lumen pudottamiseen voisi syntyä tästä resonanssista. Radan epäjatkuvuuskohta -ajatuksesta poiketen ajatuksena siis olisi, voisiko toistuva muotovirhe irrottaa lunta ja jäätä vaunusta tehokkaammin kuin yksittäinen isku. Koska lumen ja jään kiinnittymisestä ja irtoamisesta vaunuista on vähän tutkittua tietoa, voisi kokeellinen lumisen vaunun täristys lisätä tietoutta siitä, millaisilla taajuuksilla ja amplitudeilla lunta irtoaisi tehokkaammin, ja millä menetelmillä ko. tärinä olisi helpoiten toteutettavissa.



Kuva 16. Kiskon aaltokorrugaatio (Corrugation.eu, 2011).

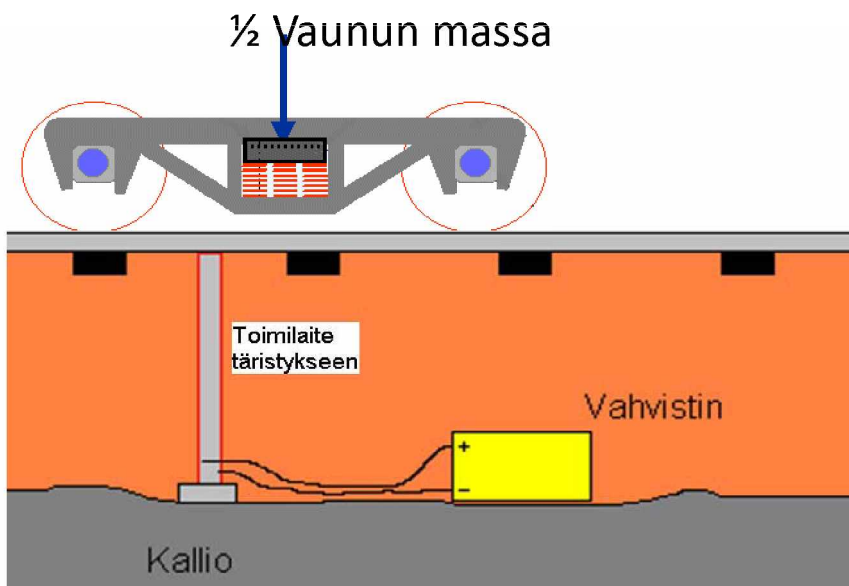
Radan täristys toimilaitteilla

Tärinää käytetään pölypuhdistukseen esimerkiksi optiikassa. Lisäksi raskaammassa teollisuudessa puretaan kuormia tärinään perustuvien toimilaitteiden avustuksella. Tärinää voidaan synnyttää tarkoitukseen suunnitelluilla toimilaitteilla. Useimmiten toimilaitteet ovat sähkömotorisia, hydraulisia tai pietsosähköisiä. Pietsosähköinen toimilaite-elementti on esitetty kuvassa 20.



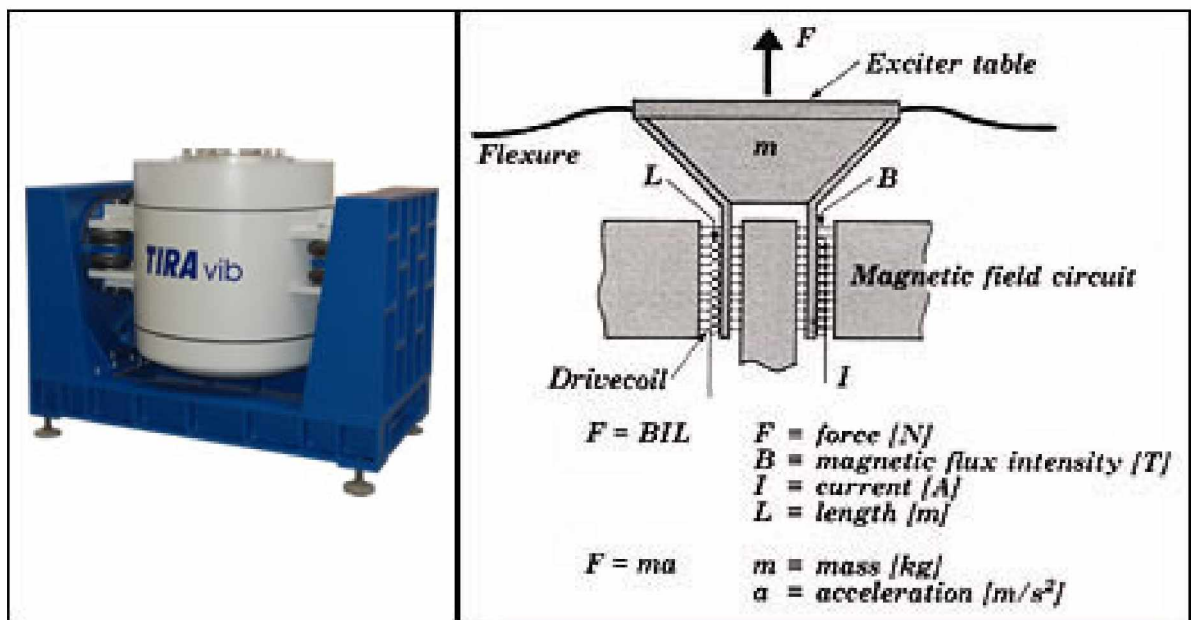
Kuva 17. Tavaravaunun tyhjentämiseen käytetty tärustin (Navco, 2011).

Tyypillisesti hydraulisilla toimilaitteilla on suurin voimantuotto, mutta kapea taajuusvaste. Pietzosähköisissä toimilaitteissa on kohtuullinen voimantuotto ja hyvä taajuusvaste, mutta liikeamplitudi on hyvin pieni. Sähkömotorinen tärustin on hyvä väli-muoto suurella liikeamplitudilla ja riittävällä voimantuotolla taajuuskaistan ollessa kuitenkin laajempi kuin tyypillisillä hydraulistäristemillä. Kuvassa 18. esitetään ajatus kiskojen täristämisestä toimilaitteella, aktuaattorin toinen pää on tuettu peruskalli-oon. Tärustin voitaisiin asentaa sulatushalliin tai juuri ennen sinne ajoa, jolloin osa lumesta saataisiin poistettua ennen sulatusta.



Kuva 18. Täristimen asennusperiaate kiskojen täristykseen.

Sähkömagneettisia täristimiä on kuvassa 19. Täristimiä valmistaa 300 kN kuormille asti mm. Tira GmbH (Tira, 2004). Rautatieteollisuuden tärinätestausta järjestää mm. ETS (European Test Services, 2011) suurissa täristinfasiliteeteissa.



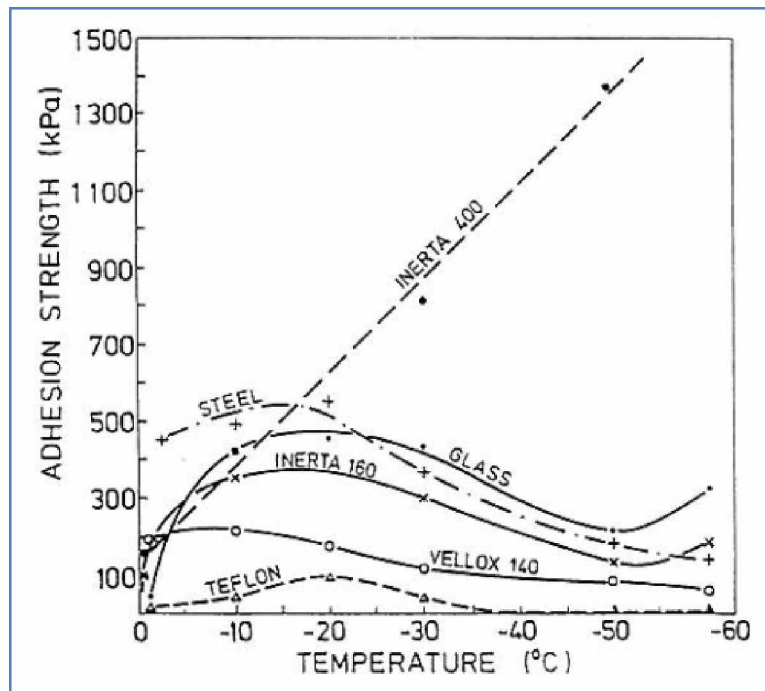
Kuva 19. TIRAn sähködynaaminen tärstin ja sen rakenne. Taajuusalue 5-2000 Hz, Maksimi amplitudi 50,8mm (Tira, 2004)



Kuva 20. Eri kokoisia pietsoaktuaattoreita (PI, 2011)

Vaunujen lunta keräävät kohdat

Lumi kerääntyy telirakenteeseen ja vaunun alustaan. Lumijään lujuus riippuu sen sisäisestä rakenteesta ja ominaispainosta. Adhesiivisen kiinnittymisen lujuus pintoihin on riippuvainen lämpötilasta ja pintamateriaalista. Kuivalla jään kasvulla viitataan yleensä härmistymisilmiöihin ja märällä jään kasvulla osittain sulan lumen tai veden jäätymiseen. Ryersonin (2008) mukaan Zakrzewski et al. (1988) ja Minsk (1984) ovat sitä mieltä, että kuiva jään kasvu on meriliikenteessä merkittävämpi tekijä kuin märkä jään kasvu, toisten lähteiden mukaan yleisessä tilanteessa kuiva jään kasvu on mitätöntä verrattuna märkään jään kasvuun (Ryerson 2008). Toisaalta näitä kumpaakin on osaltaan kutsuttu raideliikenteessä ongelmallisiksi Kloowin ja Jenstavin (2006) mukaan.



Kuva 21. Jään adheesio vahvuus eri ilmanlämpötiloissa (Makkonen 1994)

Pölyävä lumi voi kertyä vaunujen teleihin ja alustarakenteisiin. Suuret nopeuserot lumen ja vaunun välillä mahdollistavat lumen lujan kiinnittymisen pintoihin. Tämä voi vaikuttaa telin liikeulottuvuuksiin rajoittavasti. Teli ei välttämättä pysty kääntymään tai kallistumaan halutusti tai jousituksen liikematkat voivat olla rajoittuneita. Tämä lisää kiskovoimia. Pölyävän ja kulkeutuvan lumen haittoja voidaan ratata suunnatuista menetelmistä vähentää ratapenkereiden aerodynaamisella muotoilulla sekä lumiaidoilla ja lumiharjoilla. Telin rakenteet, joiden täytyy pystyä liikkumaan, tulisi Kloowin ja Jenstavin (2006) mukaan suojata taipuisalla pleksillä tai ohuilla vaahtokumikerroksilla. Kaikki kertyvä jää näissä rakenteissa putoaa pois muodonmuutoksen johdosta. Niissä pinnoissa, joissa ei liikettä ole, voitaisiin tietysti käyttää pneumaattisia jäänpoistokenkiä jäänpoistoon. Myös pyöreät pinnat ja matalakitkaiset pinnat keräävät vähemmän lunta ja jäätä. Tasaisia pintoja, jotka liikkuvat toisiaan kohti, tulisi välttää, koska lumi voi puristua ja pakkautua näissä väleissä. Avonaiset telirakenteet keräävät Kloowin ja Jenstavin (2006) mukaan vähemmän lunta kuin suhteellisen suljettu rakenne.

Yhteenveto

Tähän esiselvitystraporttiin on haettu menetelmiä, joilla voidaan estää lumen kulkeutumista vaihteisiin, menetelmiä lumen poistamiseen vaihteista sekä ratkaisuja välttää lumen kiinnittyminen liikkuvan kaluston rakenteisiin sekä ratkaisuja irrottaa lunta ja jäätä vaunuista ja teleistä.

Rautatieliikenteen ja vaihteiden lumiongelmien haitallisimpia ilmiöitä ovat:

- Pölyävän lumen puristuminen eli sintrautuminen kiinteäksi ja lujaksi massaksi vasten rakenteita suurista nopeuseroista johtuen
- Alijäähtyneen veden kerääntyminen pinnoille joko pienestä sumumaisesta pisarasta tai sateesta
- Kuurajäätyminen eli veden härmistyminen pinnoille kiinteäksi, myös suojausten taakse

Nämä ilmiöt liittyvät myös toisiinsa, sillä esimerkiksi kuurajäähtynyt pinta voimistaa alijäähtyneen veden keräytymistä pinnoille. Pölyävän lumen adheesio rakenteisiin lisääntyy pintojen ollessa kosteita. Tämä voi olla ongelma esimerkiksi vaihteenlämmityksessä, sillä kovalla pakkasella tai lumisateella lämpö ei välttämättä riitä sulattamaan ja haihuttamaan kaikkea vettä ja pahimmillaan lumi jäätyy entistä kovemmaksi massaksi vaihteisiin. Lisäksi jäänpoiston jälkeen vaunujen tulisi olla kuivia pakkaseen ajaessaan tai kostea pinta toimii lumen kerääjänä.

Lisäselvitystä vaativia potentiaalisia ratkaisuja vaihteiden ja liikkuvan kaluston jääongelmiin ovat:

- Radan täristys toimilaitteilla aiheuttaa vastaavaa tärinää kuin epäjatkuvuuskohta tai aaltokorrugaatio kiskossa. Kun kiskojen profiili on tarkasti määrätty, voidaan sama vaikutus saada aikaan toimilaitteilla kiskojen alla. Lisäksi järjestelmä voidaan pitää pois päältä tarvittaessa, joten pakollista nopeusrajoitusta ei tarvita täristysalueelle.
- Jäätä hylkivien materiaalien käyttö kaluston lunta keräävien kohtien pinnoitteena. Pinnoitteet ovat erikseen myynnissä ja niitä voi asentaa kohteisiin jälkikäteen. Oleellinen ominaisuus on jään luonnollinen irtoaminen heikon adheesion johdosta jääkerroksen kasvettua liian paksuksi ja raskaaksi, toisin sanoen itsestään irtoaminen.
- Jäänestoaineet ovat kehittyneet. Esimerkiksi tällä hetkellä käytössä oleva propyleeniglykoli ei ole ominaisuuksiltaan yhtä pysyvää kuin Nasan kehittämä glykoliseos.
- Liikkuvien rakojen suojaus kalustossa joustavalla pleksillä, jolloin taipumat irrottavat kertyneen lumen ja jään.
- Muilla pinnoilla jäänpoistokengät voisivat olla tehokas vaihtoehto, ilmaliikenteessä ja meriliikenteessä niistä on saatu hyviä kokemuksia. Tarvittava paine on junakalustossa helposti saatavilla. Sovellus junanalustoihin ei vaa di vastaavaa käyttövarmuutta ja sinänsä neopreenisten tuubien valmistaminen pitäisi olla edullista.
- Vaihteiden talvikunnossapidon tehostamispotentiaali: jäänsulatusvaunu, paine ilma, harjat ja ohjaimet, suihkumoottorit

Erikseen tulisi vielä selvittää seuraavia asioita:

- Mihin kohtiin kaluston rakenteita lumi ja jää kerääntyy, onko kalustotyypeillä tässä eroa? Onko jokin tietty kalusto erityisen ongelmallinen jään kerääjä?
- Mistä kaluston kohdista lumi ja jää irtoaa vaihteissa?
- Millaisilla voimilla lumi ja jää on kiinnittynyt, millaisen herätteen lumen ja jään pudottaminen vaatii?
- Lumen ja jään irrotusmahdollisuus kalustosta kiskojen epäjatkuvuuskohtien avulla.
- Miten yllä luetellut ilmiöt ja menetelmät eroavat vaikutuksiltaan eri lämpötiloissa tai sääolosuhteissa sekä miten lumen tai jään ominaisuudet vaikuttavat niihin?

Lähteet

Alstom, Alstom ja VR uudistavat Pendolino-junia, 19.8.2011,

<http://www.alstom.com/finland/fi/uutiset-ja-tapahtumat/ajankohtaista/alstom-ja-vr-uudistavat-pendolino-junia/>

ASCE Standard No. 7-05. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, SEI/ASCE 7-05, American Society of Civil Engineers, 2005, USA

Automerkit.fi, Venäjällä lumiaurat käyttävät MIG 15 hävittäjän moottoreita, 9.8.2009, <http://www.automerkit.fi/uutiset-trendit/muut-uutiset/artikkelit/venaejaellae-lumiaurat-kaeyttaevaet-mig-15-haevittaejaen-moottoreita.html>

Civil Aviation Authority, Aircraft icing handbook, New Zealand, 2000

Colbeck, S. C., Dynamics of Snow and Ice Masses, Academic Press, 1980, ISBN 0-12-179459-4

Corrugation.eu, Corrugation - Wheel rail corrugation in urban transport, 2011, <http://www.corrugation.eu/research/>

European Test Services, 2011,

<http://www.railway-technology.com/contractors/testing/european-testservice/>

Hakulinen, Korkeamäki, Nurmikolu, Katsaus liikkuvan kaluston ja radan vuorovaikutuksen perusteisiin, TTY, 2011

Iltalehti, Venäläiset hymistelevät VR:lle: Tervetuloa tänne junailemaan, 24.02.2010.

<http://www.iltasanomat.fi/ulkomaat/venalaiset-hymistelevat-vrille-tervetuloa-tanne-junailemaan/art-1288336197259.html>

Iwnicki, S., Handbook of Railway Vehicle Dynamics, Taylor & Francis Group, 2006, ISBN-10: 0-8493-3321-0

Jenkins, H.H., Stephenson, J.E., Clayton, G.A., Morland, G.W. & Lyon, D. The effect of track and vehicle parameters on wheel/rail vertical dynamic forces. Railway Engineering Journal, Volume 3 (1974), Issue 1. pp 2–16.

Junnikkala, J., Untinen, J. Kokeilu jään poistamiseksi kiskon epäjatkuvuuskohdan avulla, Loppuraportti, Oulun Yliopisto, 2011.

Lake-effect snow elsewhere in the world,

<http://blog.chicagoweathercenter.com/2010/01/lakeeffect-snow-elsewhere-in-t.html>

Kloov, L., Jenstav, M. High-speed train operation in winter climate, Banverket, Gröna tåget, 2006

Makkonen, L., Ice And Construction, Rilem report 13, E & FN SPON, 1994

Midwest Industrial Supply, Ice-free switch, 2010,

<http://www.midwestind.com/assets/files/Brochures-3-25-11/IFS%20Env-Tech%20Sheet-364.pdf>

Minsk, L.D., 1984, Assessment of Ice Accretion on Offshore Structures. US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, CRREL Special Report 84-4.

Navco, Navco hopper car vibrators, 2011,
<http://www.navco.org/hopper-car-unload-vibrators/hcpApp.html>

Network Rail, Dealing with the weather, 2011, <http://www.networkrailmediacentre.co.uk/Facts-and-Figures/Dealing-with-the-weather-74f/SearchCategoryID-ffffff.aspx>

Nummelin, M. Liikenteen suunta, 2/2011,
http://portal.liikennevirasto.fi/portal/page/portal/f/uutiset/liikenteen_suunta/2011_2.PDF

PhysOrg.com, UIC engineer tests improved 'icephobic' coatings, 2011,
<http://www.physorg.com/news/2011-06-uic-icephobic-coatings.html>

PI, Physic Instrumente, 2011,
<http://www.physikinstrumente.com/en/products/primages.php?sortnr=102600&picview=1#gallery>

Rail.co, Kilfrost partnership helps Finland thaw , 10.1.2011,
<http://www.rail.co/2011/01/10/kilfrost-partnership-helps-finland-thaw/>

Railway-technology.com, OSBORN International - Snow and De-Icing Brushes for Railways, 2011,
<http://www.railway-technology.com/contractors/track/osborninternational/osborninternational2.html>

Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 4, vaihteet. Liikennevirasto, Helsinki 2000.

Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 14, vaihteiden tarkastus ja kunnossapito. Liikennevirasto, Helsinki 2002.

Resiinalehti, Tampereen alueen vaihteiden kunnossapito, 1/2008,
<http://www.resiinalehti.fi/artikkeli/11>

Ryerson, Charles. Assessment of Superstructure Ice Protection as Applied to Offshore Oil Operations Safety (2008) US Army Corps of Engineers.

Smith, K. Future points to brushes. International Railway Journal, January 2010

Suomen Kuvalehti, Tämä jumitti junaliikenteen taas tänään, 22.2.2010,
<http://suomenkuvalehti.fi/jutut/talous/paivan-kuva-tama-jumitti-junaliikenteen-taas-tanaan>

Teerihalme, H., Radanpidon sähkönkulutus ja energiansäästöpotentialiaali, Liikennevirasto, Helsinki 2011.

Tekniikka&Talous, Ruotsi estää talven junakaaoksen - ostaa jättimäisen lumilingon, 6.10.2011,
<http://www.teknikkatalous.fi/metalli/ruotsi+estaa+talven+junakaaoksen++ostaa+jattimaisen+lumilingon/a698694>

The Telegraph, Inquiry launched into train snow chaos, 24.1.2007,
<http://www.telegraph.co.uk/news/uknews/1540404/Inquiry-launched-into-train-snow-chaos.html>

This Blue Marble, Discussion Forum, 2008,
<http://thisbluemarble.com/showthread.php?t=17538>

Tira, Vibration test systems, 2004, http://www.tira-gmbh.de/schwing/english/_produkte/sub.htm

Wearlon, Wearlon icephobic coatings, 2011, <http://www.wearlon.com/Eice.htm>

YouTube, Rare Find of CSX jet engine clearing snow at Palmer, MA Pt I, 23.12.2008, <http://www.youtube.com/watch?v=araoZenCSe8>

Zakrzewski, W.P., Lozowski E.P, Blackmore R.Z, 1988, Atmospheric Icing of Ships and an Overview of the Research on Atmospheric Icing Modeling Applicable to Ship Icing Modeling. In Proceedings of the Fourth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Ranska, 5–7.9.1988

